

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

1. ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ

1.1. Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑΣ

Σαν αυτοτελής επιστημονικός κλάδος η Τριβολογία ασχολείται με τα φαινόμενα που σχετίζονται με την τριβή των υλικών, τη φθορά και τη λίπανση.

Για να εξετάσει αυτά τα φαινόμενα η Τριβολογία χρησιμοποιεί γνώσεις από τη Χημεία, τη Μεταλλουργία και τη Μηχανολογία. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα των τριβολογικών φαινομένων και γι' αυτό δεν υπήρχε συστηματοποιημένη τριβολογική γνώση μέχρι πριν μερικές δεκαετίες.

Τα αποτελέσματα της Τριβολογικής έρευνας στο μεγαλύτερο βαθμό είναι χρήσιμα στο Μηχανολόγο.

Ο Μηχανολόγος στο επάγγελμά του πρέπει να δώσει λύσεις σε προβλήματα όπως:

- Ο σχεδιασμός κατασκευών
- Η συντήρηση εξοπλισμού
- Η εξοικονόμηση ενέργειας κ.α.

που έχουν σχέση με τριβολογικά προβλήματα, που καλύπτουν σχεδόν όλο τον τριβολογικό χώρο.

Έτσι ο Μηχανολόγος γίνεται δέκτης και χρήστης αποτελεσμάτων τριβολογικής έρευνας, που προήλθαν από συνεργασία πολλών ειδικοτήτων.

Για να μπορέσει ο Μηχανολόγος να ανταποκριθεί στο ρόλο αυτό έχει ανάγκη εκπαίδευσης που να του δίνει τα απαραίτητα εφόδια για την αναγνώριση των προβλημάτων και τη μεθόδευση της λύσης τους.

Αυτό σημαίνει ότι ο Μηχανολόγος πρέπει να γνωρίζει:

- Το φαινόμενο της τριβής και τους παραμέτρους που το επιρρεάζουν.
- Το μηχανισμό της φθοράς των υλικών σαν συνέπεια της τριβής και τη συνάρτηση του ρυθμού φθοράς από τις λειτουργικές παραμέτρους.
- Τη μεθοδολογία της σωστής λίπανσης σαν παράγοντας μείωσης της τριβής και της φθοράς.
- Τις υπάρχουσες λύσεις για τυποποιημένα προβλήματα όπως ο υπολογισμός εδράνων, η αναγνώριση και θεραπεία διαφόρων τύπων φθοράς κ.λπ.

1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο άνθρωπος ασχολήθηκε με φαινόμενα της τριβολογίας από τα προϊστορικά χρόνια.

- Εκμεταλεύτηκε τη θερμότητα που παράγεται με την τριβή για το άναμα της φωτιάς.

- Χρησιμοποίησε έλκυθρα για να υπερνικήσει τη δύναμη τριβής, κατά τη μεταφορά υλικών.
- Χρησιμοποίησε στην Αίγυπτο όταν κτίζονταν οι πυραμίδες, υγρά λιπαντικά για τη μεταφορά μεγάλων ογκόλιθων.
- Ανακάλυψε και χρησιμοποίησε τον τροχό για την μεταφορά υλικών. Η ανακάλυψη αυτή θεωρείται μια από τις μεγαλύτερες της ανθρωπότητας.

Η επιστημονική μελέτη των φαινομένων της τριβολογίας άρχισε από τον 15^ο αιώνα. Έτσι ο LEONARDO DA VINCI, ο AMANTONS, ο EULER και ο COULOMB ασχολήθηκαν με φαινόμενα της τριβολογίας.

Τον 19^ο αιώνα έχουμε τα πρώτα δημοσιεύματα σχετικά με έδρανα. Το πρώτο έδρανο κύλισης κατασκευάζεται στα τέλη του 19^{ου} αιώνα αλλά μεγάλη ανάπτυξη έχουμε μετά το 1950.

Ουσιαστική ανάπτυξη βλέπουμε στην επιστήμη της τριβολογίας μετά το 1950. Πάρα πολλές δημοσιεύσεις έχουν γίνει, που προσπαθούν να ερμηνεύσουν διάφορα τριβολογικά φαινόμενα. Μέχρι σήμερα όμως δεν μπορούμε να πούμε ότι έχουν δοθεί ικανοποιητικές απαντήσεις σε σειρά τριβολογικών προβλημάτων. Γι' αυτό πολλά τριβολογικά φαινόμενα θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης για πάρα πολλά ακόμη χρόνια.

1.3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑΣ

Η πρόοδος που σημειώθηκε στην έρευνα των τριβολογικών φαινομένων και η σωστή εφαρμογή των αποτελεσμάτων της, με μεγάλο οικονομικό όφελος, δημιούργησαν έντονο παγκόσμιο ενδιαφέρον.

Ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) ίδρυσε το 1965 μια διεθνή ομάδα συνδιασμένης τριβολογικής έρευνας. Η ομάδα αυτή το 1971 παρουσίασε μια έκθεση για την εφαρμογή της τριβολογίας στη βιομηχανία και τα οικονομικά της αποτελέσματα.

Την ίδια περίπου εποχή δημοσιεύτηκαν τρεις πολύ σημαντικές εκθέσεις.

- οι δύο εκθέσεις του PETER JOST
- η έκθεση BAJER

Οι εκθέσεις του PETER JOST αναφέρονται στην κατάσταση που επικρατεί στη Μ. Βρετανία, ενώ η έκθεση BAJER αφορά την Λαϊκή Δημοκρατία της Γερμανίας. Στις δύο αυτές βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες η τριβολογία εφαρμόζεται εμπειρικά και χωρίς σύστημα. Τα οικονομικά αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εντυπωσιακά.

Στις εκθέσεις του ο PETER JOST εκτιμά ότι για το 1966:

- Από τις 40×10^6 KWh που καταναλώθηκαν στην Βρετανική βιομηχανία το 35% σπαταλήθηκε σε τριβές που θα μπορούσαν να αποφευχθούν. (Οικονομία 28×10^6 λίρες).

- Θα μπορούσε να υπάρχει αύξηση της απόδοσης 1% των βιομηχανικών μονάδων, που θα έχει σαν αποτέλεσμα οικονομία 22×10^6 λίρες.
- Θα μπορούσε να αυξηθεί η ζωή του εξοπλισμού κατά 10%, που θα έχει σαν αποτέλεσμα οικονομία 100×10^6 λίρες.
- Από την κακή λίπανση αυξήθηκαν οι εργασίες συντήρησης με αντίστοιχη αύξηση του κόστους κατά 10×10^6 λίρες.
- Η βελτίωση του εξοπλισμού της βιομηχανίας θα εξοικονομούσε το 20% των χρησιμοποιούμενων λιπαντικών, με αποτέλεσμα οικονομία 10×10^6 λιρών.
- Ήταν δυνατή μείωση των βλαβών κατά 20% με αποτέλεσμα οικονομία 230×10^6 λιρών.
- Από την αποφυγή των συνεπειών, των βλαβών μπορούσε να υπάρχει οικονομία 115×10^6 λιρών.

Δηλαδή συνοπτικά.

1. Μείωση κατανάλωσης ενέργειας	28×10^6 λίρες
2. Αύξηση απόδοσης	22×10^6 λίρες
3. Αύξηση ζωής εξοπλισμού	100×10^6 λίρες
4. Μείωση εργατικών συντήρησης	10×10^6 λίρες
5. Οικονομία λιπαντικών	10×10^6 λίρες
6. Μείωση βλαβών	230×10^6 λίρες
7. Μείωση συνεπειών βλαβών	115×10^6 λίρες
Σύνολο	515×10^6 λίρες

Βλέπουμε ότι για την Βρετανική βιομηχανία έχουμε για το 1966 μια διαρροή κεφαλαίου της τάξης των 515×10^6 λιρών, εξαιτίας της λανθασμένης αντιμετώπισης των τριβολογικών φαινομένων.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πόσο μεγάλη οικονομική σημασία έχει για την βιομηχανία η έρευνα των τριβολογικών φαινομένων και η σωστή εφαρμογή των αποτελεσμάτων της.

2. ΤΡΙΒΗ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Τριβή ονομάζουμε την αντίσταση στην κίνηση που αναπτύσσεται όταν ένα σώμα κινείται ή τείνει να κινηθεί πάνω σε ένα άλλο.

Τα σώματα μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Ανάλογα με τη φύση των σωμάτων έχουμε τα παρακάτω είδη τριβής.

- Μηχανική τριβή όταν και τα δύο σώματα είναι στερεά.
- Υδροδυναμική τριβή όταν το ένα σώμα είναι στερεό και άλλο υγρό.
- Αεροδυναμική τριβή όταν το ένα σώμα είναι στερεό και το άλλο αέριο.

Ανάλογα με το είδος της κίνησης έχουμε.

- Την τριβή ολίσθησης όταν το ένα σώμα ολισθαίνει πάνω στο άλλο.
- Την τριβή κύλισης όταν το ένα σώμα κυλιέται πάνω στο άλλο.

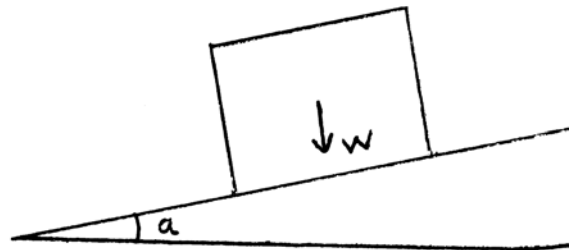
Δυνάμεις τριβής αναπτύσσονται επίσης κατά την κίνηση αερίων και υγρών μεταξύ των μορίων τους. Το είδος αυτό της τριβής το ονομάζουμε εσωτερική τριβή.

Όταν έχουμε τριβή μεταξύ στερεών σωμάτων, οι επιφάνειες επαφής μπορεί:

- Να έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους και τότε έχουμε ξηρή τριβή.
- Να διαχωρίζονται από ένα στρώμα λιπαντικού και τότε έχουμε υγρή τριβή.
- Να υπάρχουν σημεία άμεσης επαφής και σημεία διαχωρισμού από στρώμα λιπαντικού και τότε έχουμε την ενδιάμεση κατάσταση της ημιυγρής τριβής.

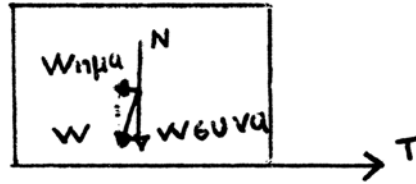
2.2. ΠΕΙΡΑΜΑ COULOMB

Παίρνουμε ένα σώμα βάρους W και το τοποθετούμε πάνω σε επίπεδο που μπορούμε να μεταβάλλουμε την κλίση του (Σχ. 2.1)



Σχ. 2.1

Αυξάνουμε σταδιακά την κλίση. Όταν το σώμα ισορροπεί έχουμε το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του σχήματος 2.2.



Σχ. 2.2

Έτσι παίρνουμε το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow T - W\eta\mu\alpha = 0 \Rightarrow T = W\eta\mu\alpha \quad (2.2.1.)$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow N - W\sigma\upsilon\nu\alpha = 0 \Rightarrow N = W\sigma\upsilon\nu\alpha \quad (2.2.2.)$$

Διαιρώντας κατά μέλη έχουμε:

$$\frac{T}{N} = \epsilon\phi\alpha \quad (2.2.3.)$$

Όταν η γωνία α πάρει την τιμή α_σ τότε το σώμα αρχίζει να κινείται. Η εξίσωση (2.2.3) μετασχηματίζεται στην:

$$\frac{T\sigma}{N} = \epsilon\phi\alpha_\sigma = \mu_\sigma \Rightarrow T\sigma = N\mu_\sigma \quad (2.2.4.)$$

Το μ_σ ονομάζεται συντελεστής στατικής τριβής. Η $T\sigma$ ονομάζεται δύναμη στατικής τριβής και είναι η μεγίστη δυνατή δύναμη τριβής που εμφανίζεται.

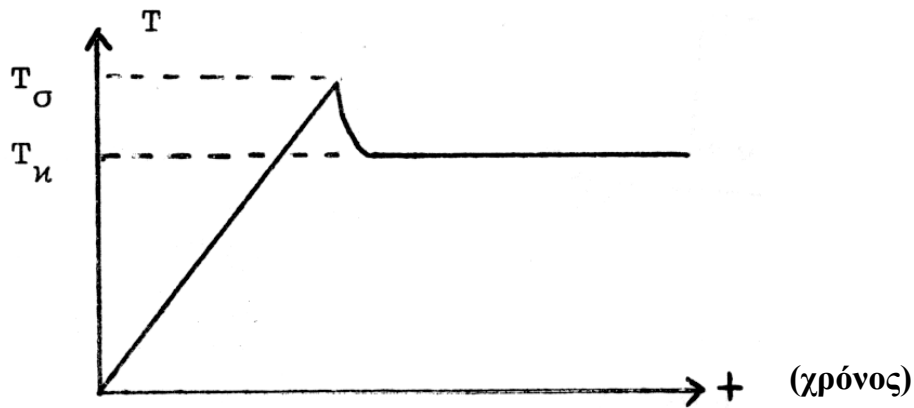
Αφού αρχίσει η ολίσθηση, η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται είναι πάντα μικρότερη από τη δύναμη στατικής τριβής. Τότε θα έχουμε:

$$T\kappa = \mu_\kappa \cdot N \quad (2.2.5.)$$

όπου $T\kappa$ η δύναμη κινητικής τριβής

μ_κ ο συντελεστής κινητικής τριβής.

Παραστατικά η μεταβολή της δύναμης τριβής φαίνεται στο Σχ. 2.3



Σχ. 2.3

Στον πίνακα 2.1 φαίνονται οι τιμές των συντελεστών τριβής για διάφορα υλικά.

2.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων σχετικά με την ξηρή τριβή ολίσθησης δημοσιεύθηκαν από τον COULOMB το 1781. Τα συμπεράσματα από τα πειράματα του COULOMB είναι:

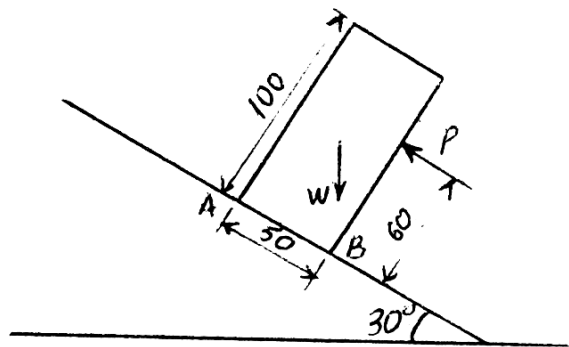
- α. Η δύναμη τριβής είναι ανάλογος της κάθετης δύναμης N που δρα στην επιφάνεια τριβής.
- β. Το μέγεθος της δύναμης τριβής είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος της επιφάνειας τριβής.
- γ. Η δύναμη τριβής έχει τον ίδιο φορέα με τη σχετική ταχύτητα αντίθετη όμως φορά.
- δ. Η δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της σχετικής ταχύτητας.
- ε. Οι συντελεστές στατικής τριβής μ_s και κινητικής τριβής μ_k εξαρτώνται:
 - α. Από το είδος του υλικού των επιφανειών
 - β. Από την ταχύτητα των επιφανειών
 - γ. Από την ύπαρξη ή όχι λιπαντικού και το είδος αυτού.

Πίνακας 2.1

Τριβόμενα υλικά	μ_s	μ_k
Σιδερένιοι τροχοί σε σιδηροτροχιές	0,24	0,027-0,09
Ελαστικοί τροχοί σε άσφαλτο	0,8-0,9	0,7-0,8
Χάλυβας σε χάλυβα	0,74-0,78	0,42-0,57
Αλουμίνιο σε αλουμίνιο	1,4	1,05
Νικέλιο σε νικέλιο	1,1	0,53
Γυαλί σε γυαλί	0,94	0,40
Χυτοσίδερος σε χυτοσίδερο	1,1	0,15
Γυαλί σε νικέλιο	0,78	0,56
Χαλκός σε χυτοσίδερο	1,05	0,29
Αλουμίνιο σε μαλακό χάλυβα	0,61	0,47
Ψευδάργυρος σε χυτοσίδερο	0,85	0,21

2.4. ΑΣΚΗΣΕΙΣ

2.4.1. Σώμα βάρους 1000 Kgr εδράζεται σε κεκλιμένο επίπεδο. Σχ. 2.4. Ζητείται να προσδιοριστεί το διάστημα μεταβολής της δύναμης P ώστε το σώμα να ισορροπεί. Ο συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ σώματος και επιπέδου είναι 0,25.



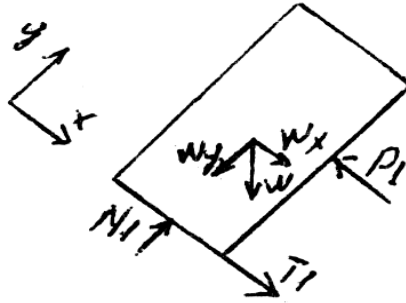
Σχ. 2.4

ΛΥΣΗ

Για να έχουμε κίνηση του σώματος θα πρέπει αυτό να ολισθαίνει ή να ανατρέπεται.

Οριακές συνθήκες για ολίσθηση του σώματος είναι:

α. Ολίσθηση του σώματος προς το επάνω μέρος του κεκλιμένου επιπέδου.
Τότε οι δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σώμα φαίνονται πάνω στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος (Σχ. 2.5).



Σχ. 2.5

$$\text{Ισορροπία ως προς X} \quad \Sigma F_x = 0 \Rightarrow T_1 - P_1 + W_x = 0 \quad (2.4.1.)$$

$$\text{Ισορροπία ως προς Y} \quad \Sigma F_y = 0 \Rightarrow N_1 - W_y = 0 \quad (2.4.2.)$$

$$W_x = \eta\mu 30^\circ \cdot W \frac{1}{2} 100 = 500 \text{ Kgr} \quad (2.4.3.)$$

$$W_y = \sigma\upsilon\nu 30^\circ \cdot W \frac{\sqrt{3}}{2} 100 = 860 \text{ Kgr} \quad (2.4.4.)$$

$$(2.4.1.) \quad \Lambda \quad (2.4.3.) \Rightarrow P_1 = T_1 + 500 \quad (2.4.5.)$$

$$(2.4.2.) \quad \Lambda \quad (2.4.4.) \Rightarrow N_1 = 866 \text{ Kgr} \quad (2.4.6.)$$

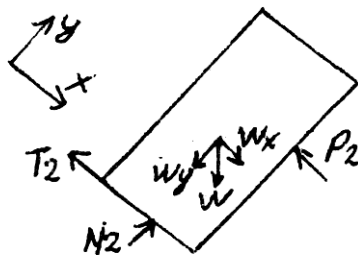
Επίσης από την εξίσωση τριβής έχουμε:

$$T_1 = \mu \cdot N_1 = 0,25 \cdot N_1 \quad (2.4.7.)$$

$$(2.4.7.) \quad \Lambda \quad (2.4.6.) \Rightarrow T_1 = 0,25 \cdot 866 = 216,5 \text{ Kgr} \quad (2.4.8.)$$

$$\text{Άρα} \quad P_1 = 500 + 216,5 = 716,5 \text{ Kgr} \quad (2.4.9.)$$

β. Ολίσθηση του σώματος προς το κάτω μέρος του κεκλιμένου επιπέδου.
Τότε οι δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σώμα φαίνονται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος (Σχ. 2.6)



Σχ. 2.6

Ισορροπία ως προς X $\Sigma F_x = 0 \Rightarrow T_2 + P_2 = W_x$ (2.4.10.)

Ισορροπία ως προς Y $\Sigma F_y = 0 \Rightarrow N_2 = W_y$ (2.4.11.)

(2.4.3.) $\wedge$ (2.4.10.) $\Rightarrow P_2 = 500 - T_2$ (2.4.12.)

(2.4.4.) $\wedge$ (2.4.11.) $\Rightarrow N_2 = 866 \text{ Kgr}$ (2.4.13.)

Από την εξίσωση τριβής έχουμε:

$T_2 = \mu N_2 = 0,25 \cdot 866 = 216,5 \text{ Kgr}$ (2.4.14.)

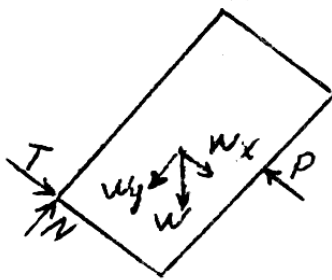
Άρα $P_2 = 500 - 216,5 = 283,5 \text{ Kgr}$ (2.4.15.)

Δεν έχουμε ολίσθηση επομένως όταν:

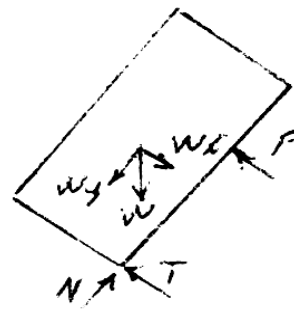
$P_2 \leq P \leq P_1 \Rightarrow 283,5 \leq P \leq 716,5$ (2.4.16.)

γ. Ανατροπή γύρω από το σημείο Α

Οι δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σώμα φαίνονται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος του σχήματος Σχ. 2.7α



Σχ. 2.7α



Σχ. 2.7β

Για να έχουμε ανατροπή θα πρέπει να έχουμε:

$P \cdot 60 \geq W_x \cdot 50 + W_y \cdot 25$ (2.4.17.)

(2.4.3.) $\wedge$ (2.4.4.) $\wedge$ (2.4.17.) $\Rightarrow P \cdot 60 \geq 500 \cdot 50 + 866 \cdot 25 \Rightarrow$
 $\Rightarrow P \geq \frac{25000 + 21650}{60} = 777,5 \text{ Kgr}$ (2.4.18.)

δ. Ανατροπή γύρω από το σημείο Β.

Οι δυνάμεις που επιδρούν πάνω στο σώμα φαίνονται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος του σχήματος Σχ. 2.7β.

Για να έχουμε ανατροπή θα πρέπει να έχουμε:

$P \cdot 60 \leq W_x \cdot 50 - W_y \cdot 25$ (2.4.19.)

$$(2.4.3.) \quad \Lambda \quad (2.4.4.) \quad \Lambda \quad (2.4.19.) \Rightarrow P \cdot 60 \leq 500 \cdot 50 - 866 \cdot 25 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P \leq \frac{25000 + 21650}{60} = 55,83 \quad \text{Kgr} \quad (2.4.20.)$$

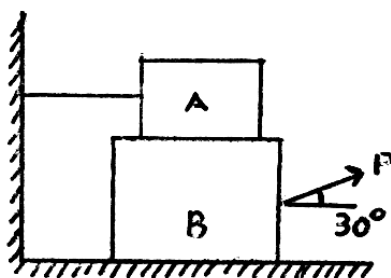
Άρα για να μην έχουμε ανατροπή θα πρέπει:

$$55,83 \leq P \leq 777,5 \quad (2.4.21.)$$

Όπως βλέπουμε από την (2.4.16) Λ (2.4.21.) στο διάστημα από 283,5 Kgr μέχρι 716,5 Kgr δεν έχουμε ούτε ολίσθηση, ούτε ανατροπή, άρα το σώμα ισορροπεί.

2.4.2. Το σώμα A βάρους 20 Kgr εδράζεται πάνω στο σώμα B βάρους 50 Kgr. Το σώμα A συγκρατείται με ένα νήμα όπως φαίνεται στο σχήμα Σχ. 2.8.

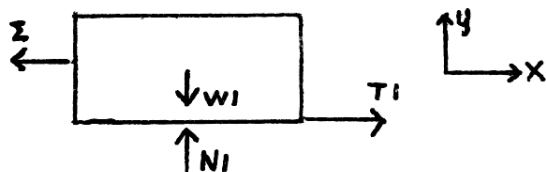
Ο συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ του σώματος A και B είναι ίσος με το συντελεστή τριβής μεταξύ του B και του δαπέδου. Ζητείται η τιμή του συντελεστή στατικής τριβής για να έχουμε έναρξη κίνησης του B για $P = 10$ Kgr.



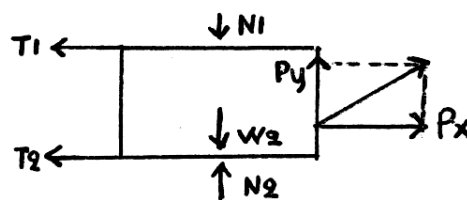
ΛΥΣΗ

Επειδή δε μας δίνεται η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης από το δάπεδο, θα εξετάσουμε μόνο την περίπτωση ολίσθησης.

Κατά τη στιγμή της έναρξης της ολίσθησης του σώματος B θα επιδρούν στο σώμα A οι δυνάμεις που φαίνονται στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος του Σχ. 2.9α



Σχ. 2.9α



Σχ. 2.9β

$$\text{Ισορροπία ως προς X:} \quad \Sigma F_x = 0 \Rightarrow T_1 - \Sigma = 0 \Rightarrow T_1 = \Sigma \quad (2.4.1.)$$

$$\text{Ισορροπία ως προς Y:} \quad \Sigma F_y = 0 \Rightarrow N_1 - W_1 = 0 \Rightarrow N_1 = W_1 \quad (2.4.2.)$$

Από την εξίσωση τριβής $T_1 = \mu_\sigma \cdot N_1$ (2.4.3.)

(2.4.3.) $\wedge$ (2.4.2.) $\Rightarrow T_1 = \mu_\sigma \cdot W_1$ (2.4.4.)

Κατά την έναρξη της ολίσθησης στο σώμα Β επιδρούν οι δυνάμεις που φαίνονται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος του Σχ. 2.9β

Ισορροπία ως προς X : $P_x - T_1 - T_2 = 0$ (2.4.5.)

Y : $P_y = N_2 - W_2 - N_1 = 0$ (2.4.6.)

$P_x = P \sin 30 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10 \Rightarrow P_x = 8,66 \text{ Kgr}$ (2.4.7.)

$P_y = P \cos 30 = \frac{1}{2} \cdot 10 \Rightarrow P_y = 5 \text{ Kgr}$ (2.4.8.)

(2.4.2.) $\wedge$ (2.4.6.) $\wedge$ (2.4.8.) $\Rightarrow N_2 = 50 + 20 - 5 = 65 \text{ Kgr}$ (2.4.9.)

$\Rightarrow T_2 = \mu_\sigma \cdot 65$ (2.4.10.)

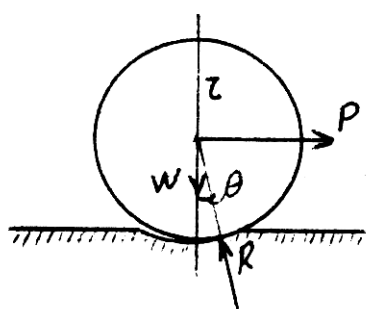
(2.4.10.) $\wedge$ (2.4.4.) $\wedge$ (2.4.7.) $\wedge$ (2.4.5.) $\Rightarrow$

Άρα από τις $\Rightarrow 8,66 - \mu_\sigma \cdot 20 - \mu_\sigma \cdot 65 = 0 \Rightarrow \mu_\sigma = \frac{8,66}{20 + 65} \Rightarrow \mu_\sigma = 0,102$

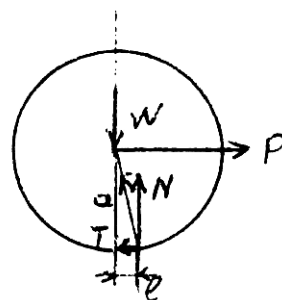
2.5. ΤΡΙΒΗ ΚΥΛΙΣΗΣ

Τριβή κύλισης ονομάζουμε την αντίσταση στην κίνηση που αναπτύσσεται όταν ένα κυλινδρικό σώμα κυλίεται πάνω σε μια επιφάνεια.

Από το βάρος του κυλινδρικού σώματος ακτίνας r έχουμε παραμόρφωση της επιφάνειας επαφής όπως φαίνεται στο Σχ. 2.10α



Σχ. 2.10α



Σχ. 2.10β

Κάνουμε το διάγραμμα ελεύθερου σώματος (Σχ. 2.10β)

Από την ισορροπία του σώματος έχουμε:

$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow P - T = 0 \Rightarrow P = T$ (2.5.1.)

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow N - W = 0 \Rightarrow N = W \quad (2.5.2.)$$

$$\Sigma M_o = 0 \Rightarrow T_a - N \cdot l = 0 \quad (2.5.3.)$$

$$\text{Επειδή η γωνία } \theta \text{ είναι πολύ μικρή το } a \approx \tau \quad (2.5.4.)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$P \cdot \tau = W \cdot l = M_k \quad (2.5.5.)$$

Τη ροπή M_k ονομάζουμε τριβή κύλισης.

Η σταθερά l ονομάζεται συντελεστής τριβής κύλισης και εξαρτάται από την πλαστικότητα των υλικών κυρίως που είναι κατασκευασμένα ο κύλινδρος και το επίπεδο.

Ο συντελεστής τριβής κύλισης l δίνεται σε μονάδες μήκους.

Έτσι ο συντελεστής τριβής κύλισης

- Σιδηροτροχού σε σιδηροτροχιά είναι 0,05 cm.
- Ελαστικού τροχού σε ασφαλτικό οδόστρωμα είναι 0,2 cm.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (2.5.5.) για να έχουμε κίνηση με σταθερή ταχύτητα πρέπει να εφαρμόσουμε δύναμη P όπου:

$$P = \frac{l}{\tau} \cdot W \quad (2.5.6.)$$

Η δύναμη P είναι ανάλογη με τον συντελεστή τριβής κύλισης, το βάρος που φέρει ο κύλινδρος και αντιστρόφως ανάλογη με την ακτίνα του κυλίνδρου.

2.5.1. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Σιδηροδρομικό βαγόνι έχει βάρος 10 tn. Να βρεθεί η δύναμη που απαιτείται για την έλξη του:

α. Όταν έχουμε κύλιση τροχών

β. Όταν έχουμε ολίσθηση τροχών

Δίνεται ότι η διάμετρος των τροχών είναι 1m.

ΛΥΣΗ

α) Για την κίνηση του βαγονιού χρειάζεται σε κάθε τροχό να εφαρμόσουμε δύναμη P_i όπου:

$$P_i = \frac{0,05}{50} \cdot W_i$$

Η συνολική δύναμη που απαιτείται είναι:

$$P = \Sigma P_i = \frac{0,05}{50} \cdot \Sigma W_i = \frac{0,05}{50} \cdot 10000 = 10 \text{ Kgr}$$

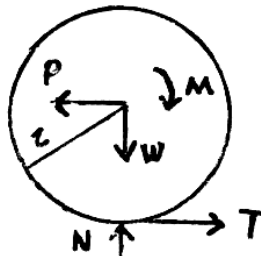
β) Η δύναμη που απαιτείται για την έλξη του βαγονιού όταν οι τροχοί ολισθαίνουν είναι:

$$R_{ολ} = 0,1 \cdot 10.000 = 1000 \text{ Kgr}$$

Βλέπουμε από τα παραπάνω ότι με την κύλιση χρειαζόμαστε δύναμη 100 φορές μικρότερη σε σχέση με αυτή της ολίσθησης.

2.6. ΤΡΙΒΗ ΣΕ ΤΡΟΧΟΥΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στα οχήματα συνήθως ένα ζεύγος τροχών στρέφεται με στρεπτική ροπή που μεταφέρεται στους τροχούς με τη βοήθεια του συστήματος μετάδοσης κίνησης, από τον κινητήρα. Δημιουργείται έτσι η απαραίτητη δύναμη που κινεί το όχημα.



Σχ. 2.11

Στο Σχ. 2.11 έχουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός τροχού κίνησης. Τα μεγέθη που υπάρχουν σε αυτό είναι:

M : στρεπτική ροπή

W : βάρος

P : δύναμη έλξης

T : δύναμη τριβής

N : αντίδραση εδάφους

Για ομαλή κίνηση ισχύουν οι εξισώσεις ισορροπίας:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow T - P = 0 \quad (2.6.1.)$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow N - W = 0 \quad (2.6.2.)$$

$$\Sigma M_o = 0 \Rightarrow M - T \cdot \tau = 0 \quad (2.6.3.)$$

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η δύναμη τριβής είναι:

$$T_{\max} = \mu_{\sigma} \cdot N \Rightarrow T_{\max} = \mu_{\sigma} \cdot W \quad (2.6.4.)$$

Άρα η μέγιστη ροπή που μπορεί να δεχθεί ο τροχός χωρίς να έχουμε ολίσθηση είναι:

$$M_{\max} = \mu_{\sigma} \cdot W \cdot \tau \quad (2.6.5.)$$

Όπως φαίνεται από την (2.6.5.) η μέγιστη ροπή είναι ανάλογη του συντελεστή στατικής τριβής, του βάρους που δέχεται ο τροχός και της ακτίνας του.

Από την (2.6.1.) Λ (2.6.4.) έχουμε:

$$T_{\max} = P_{\max} = W \cdot \mu_{\sigma}$$

Άρα η δύναμη έλξης μπορεί να πάρει τιμές μέχρι μια μέγιστη τιμή που αν την περάσει θα έχουμε ολίσθηση των τροχών. Η μέγιστη τιμή της δύναμης έλξης είναι ανάλογη του συντελεστή στατικής τριβής και του βάρους που φέρει ο τροχός. Σε τραίνο για παράδειγμα μπορεί να έχουμε ολίσθηση των τροχών κίνησης της μηχανής του όταν φορτώσουμε υπερβολικά τα βαγόνια.

3. ΦΘΟΡΑ

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Φθορά ονομάζουμε την απόσπαση υλικού από τις στερεές επιφάνειες εξ αιτίας της μηχανικής ενέργειας.

Το αντικείμενο της φθοράς είναι σχεδόν ανυπολόγιστης οικονομικής σημασίας, γιατί είναι ο παράγοντας αυτός, που περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο καθορίζει τη χρήσιμη ζωή των περισσότερων μηχανολογικών μηχανισμών.

Το χαρακτηριστικό της διαδικασίας της φθοράς είναι ότι προχωρά πολύ αργά και η ποσότητα του υλικού που φθείρεται είναι πολύ μικρή. Έτσι για παράδειγμα, ένα καινούργιο αυτοκίνητο που ζυγίζει 1000 Kgr μπορεί να αχρηστευθεί εξ αιτίας της φθοράς, χάνοντας μόνο 200 gr υλικού από κρίσιμες φθειρόμενες επιφάνειες.

Είναι αξιοσημείωτο ότι παρά τη μεγάλη σημασία του θέματος, η συστηματική μελέτη της διαδικασίας της φθοράς άρχισε τα τελευταία χρόνια.

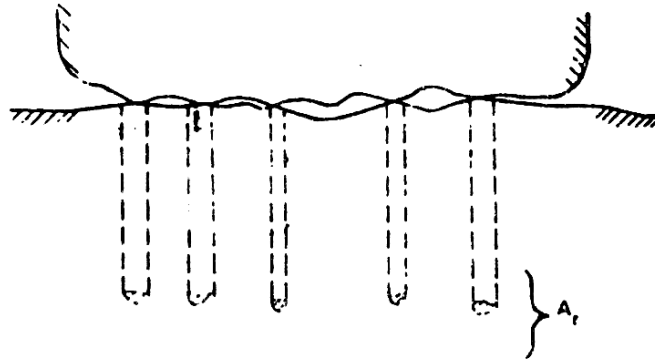
Ένας λόγος για την καθυστέρηση της μελέτης της φθοράς είναι, ότι ο ρυθμός φθοράς είναι πολύ χαμηλός.

Δεν υπήρχε πριν μερικά χρόνια ένας εύκολος τρόπος συνεχούς μελέτης της διαδικασίας φθοράς.

Αυτό άλλαξε με την ανακάλυψη των ραδιοϊσοτόπων το 1940, που σαν αποτέλεσμα είχε να είναι δυνατή η τεχνική της μέτρησης πολύ μικρών ποσοτήτων υλικού που μεταφέρεται ή χάνεται. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι με την χρησιμοποίηση ραδιοϊσοτόπων είναι δυνατή η μέτρηση απώλειας υλικού από την επιφάνεια δοντιού μετά από μια διαδρομή της οδοντόβουρτσας.

Το εναρκτήριο σημείο της μοντέρνας θεωρείας για τη φθορά είναι οι κλασικές έρευνες των BOWDEN και TABOR πάνω στη φύση της τριβής και η δουλειά του HOLM στις ιδιότητες των ηλεκτρικών επαφών.

Το 1939 οι BOWDEN και TABOR έβγαλαν τη γνωστή σχέση που σχετίζει την πραγματική με την φαινόμενη επιφάνεια επαφής που προκύπτει όταν μια επιφάνεια πιεσθεί πάνω σε μια άλλη. Σχ. 3.1



Σχ. 3.1

Η πραγματική επιφάνεια επαφής δίνεται από την εξίσωση:

$$A_r = \frac{L}{H} \quad (3.1.1.)$$

όπου:

A_r : πραγματική επιφάνεια επαφής

L : το φορτίο

H : η σκληρότητα διεύθυνσης της επιφάνειας.

Καθώς το ονομαστικό φορτίο μεταξύ των επιφανειών αυξάνει, συμβαίνει πρώτα ελαστική και μετά πλαστική παραμόρφωση. Έτσι δημιουργείται η πραγματική επιφάνεια επαφής. Υπολογισμοί και μεταγενέστερες μετρήσεις έδειξαν ότι, η πραγματική επιφάνεια επαφής για φορτία συνήθως μεγέθους σε μηχανολογικά μηχανήματα ήταν πολύ μικρότερη από την φαινόμενη επιφάνεια επαφής.

Το επόμενο βήμα ήταν να εφαρμόσουμε αυτές τις ιδέες στην ερμηνεία των γνωστών νόμων της τριβής και ιδιαίτερα στην παρατήρηση ότι όταν δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή, η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της δύναμης μεταξύ των επιφανειών και ανεξάρτητη της φαινόμενης επιφάνειας επαφής. Η ιδέα της πραγματικής επιφάνειας επαφής μεταξύ των επιφανειών εξηγεί την ανεξαρτησία της δύναμης τριβής από την φαινόμενη επιφάνεια.

Έτσι εύκολα φθάσαμε στην ερμηνεία της δύναμης τριβής σαν τη δύναμη που απαιτείται για την διάτμηση των συνδέσεων που αποτελούν την πραγματική επιφάνεια επαφής.

Διακρίνουμε πέντε (5) είδη φθοράς:

1. Φθορά κόπωσης
2. Φθορά λείανσης
3. Φθορά πρόσφυσης

4. Φθορά χημικής διάβρωσης
5. Φθορά μηχανικής διάβρωσης.

3.2. ΦΘΟΡΑ ΚΟΠΩΣΗΣ

Με την πρώτη ματιά η κόπωση φαίνεται να είναι η απλούστερη φθορά μηχανισμού μια και βασίζεται στην επίδραση καταπονήσεων σε επιφάνεια χωρίς να έχουμε επαφές στερεών σωμάτων. Αυτό προκύπτει από την παρατήρηση ότι τα αποτελέσματα της κόπωσης παρατηρήθηκαν σε έδρανα όπου οι επιφάνειες ήταν διαχωρισμένες από παχύ στρώμα λιπαντικού.

Τα αποτελέσματα της κόπωσης τα έχουμε συνήθως όταν έχουμε επαναλαμβανόμενη καταπόνηση σε κυκλική ή ευθύγραμμη επαφή.

Στην κόπωση αναπτύσσεται θραύση κάτω από την επίδραση εναλλασσόμενων δυνάμεων. Δεν θα είχαμε αστοχία υλικού αν επιβάλλουμε μόνο θλίψη ή μόνο εφελκυσμό.

Επειδή η κόπωση είναι φαινόμενο συνηθισμένο στις κυλιόμενες επιφάνειες, όπως οι σφαίρες στα ρουλεμάν, θα εξετάσουμε πρώτα την κόπωση σε κυλιόμενες επιφάνειες.

Συγκρίνοντας την κόπωση επιφανειών σε κυλιόμενες επιφάνειες με την συνήθη κόπωση του κυρίου όγκου των υλικών, υπάρχουν δύο διαφορές.

1. Οι αυξομειώσεις στο χρόνο αστοχίας, ο χρόνος ζωής είναι πιο αυστηρός στις κυλιόμενες επαφές.
2. Στην κόπωση του κύριου όγκου των υλικών υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο δύναμης για συγκεκριμένο υλικό κάτω από το οποίο το υλικό δεν έχει πρόβλημα φθοράς από κόπωση. Τέτοιο όριο δεν έχει ανακαλυφθεί στην περίπτωση της κόπωσης επιφάνειας.

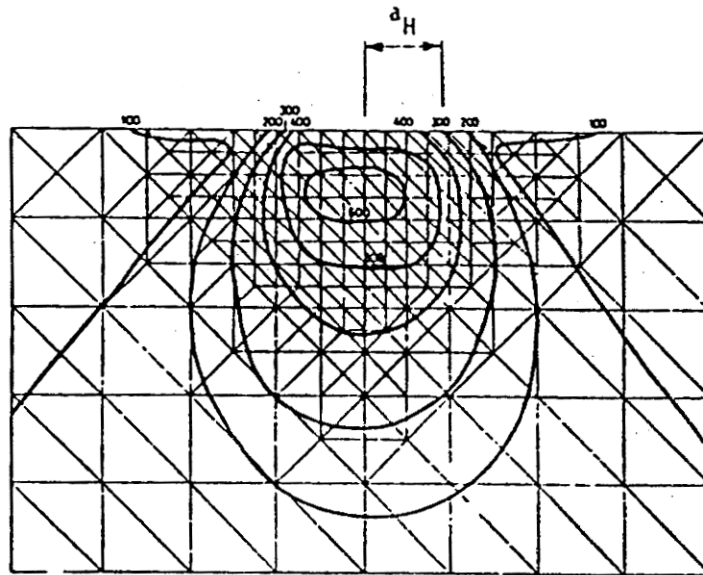
Για να καταλάβουμε πως και που σχηματίζονται οι ρωγμές από την κόπωση επιφάνειας πρέπει να λάβουμε υπόψη την φύση των καταπονήσεων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια.

Η θεωρία του HERTZ για τις ελαστικές επαφές λέει ότι η μέγιστη τάση συμπίεσης δημιουργείται στην επιφάνεια και η μέγιστη συνεχής διατμητική τάση σε απόσταση y κάτω από την επιφάνεια. (π.χ. στην περίπτωση επαφής δύο κυλίνδρων με εύρος επαφής $2a_H$ το y είναι $0,78 a_H$).

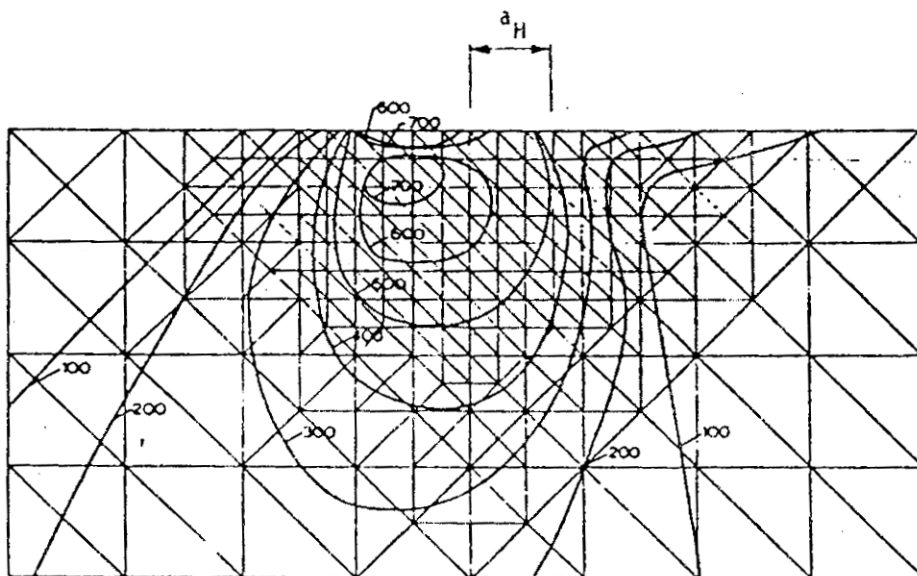
Σε συνθήκες κυλιόμενων επιφανειών η σημαντικότερη παράμετρος καταπόνησης είναι η μέγιστη ανάστροφη διατμητική τάση και αυτή βρίσκεται πλησιέστερα προς την επιφάνεια από τη μέγιστη συνεχή διατμητική τάση.

Αν η επαφή υπόκειται και σε σημαντικές επιφανειακές δυνάμεις έλξης, τότε η θέση των παραπάνω μέγιστων διατμητικών τάσεων αλλάζει και πηγαίνει στην περιοχή της επιφάνειας. Οι δύο περιπτώσεις φαίνονται στα Σχ.

3.1 και Σχ. 3.2, τα οποία αναπαριστούν την κατανομή των καταπονήσεων στην περίπτωση επαφής κυλίνδρων με επίπεδη επιφάνεια.



Σχ. 3.1 Μέγιστες διατμητικές τάσεις για κάθετα φορτία.



Σχ. 3.2 Μέγιστες διατμητικές τάσεις για συνδιασμό κάθετων και εφαπτομενικών φορτίων.

Αν και έχει γίνει σημαντική πρόοδος στον υπολογισμό της κατανομής των τάσεων σε κυλιόμενες επαφές, η επίδραση μερικών άλλων παραγόντων πρέπει να ληφθεί υπόψη.

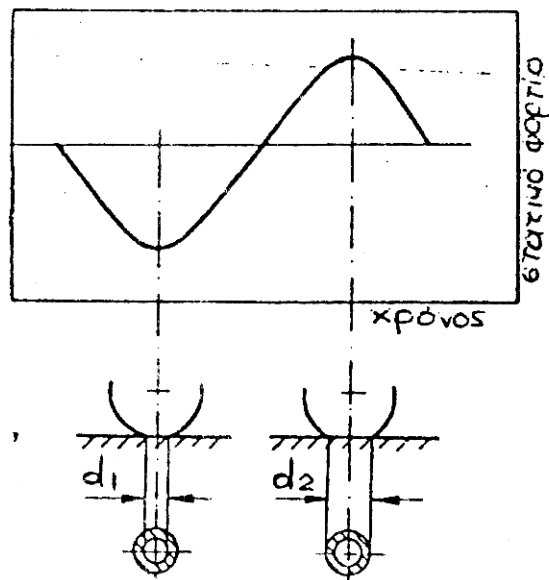
Οι παράγοντες αυτοί μεταβάλλουν την ονομαστική κατανομή των τάσεων όπως την υπολογίσαμε σε ομογενή, ισότροπα, ελαστικά υλικά, με λεία επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή κατά την κύλιση.

Τέτοιοι παράγοντες είναι η δομή της επιφάνειας, η μικροδομή, η ύπαρξη οξειδίων, καρβιδίων ή σουλφιδίων, η ύπαρξη γραμμώσεων, φθορά από σκουριά, η τριβή, κατανομή των φορτίων κ.α.

Όπως φαίνεται η ύπαρξη του μεγάλου αριθμού παραγόντων που επιδρούν στην κόπωση των κυλιόμενων επιφανειών δείχνει την πολυπλοκότητα του φαινομένου.

Πειραματική μελέτη του φαινομένου της κόπωσης επιφανειών έγινε από τους TYLER, BURTON και KU.

Σε επαφή σφαίρας και επίπεδου δοκίμιου εφαρμόσθηκε περιοδική φόρτιση. Το φορτίο ήταν κάτω από το όριο ελαστικότητας.



Σχ. 3.3

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3 δημιουργήθηκαν δύο κυκλικές επαφές στα δοκίμια που αντιστοιχούν στο ελάχιστο και μέγιστο φορτίο. Σαν αποτέλεσμα της ταλαντούμενης φόρτισης είχαμε τρία είδη καταστροφών.

- α. Στην δακτυλιοειδή περιοχή μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού κύκλου επαφής, φθορά τριβής συμβαίνει σαν αποτέλεσμα των διατμητικών έλξεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης που επηρεάζονται από την διαφορά του συντελεστή ελαστικότητας των δοκιμίων.
- β. Στο κεντρικό τμήμα της επιφάνειας επαφής δημιουργείται εσοχή εξ αιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης από τα επαναλαμβανόμενα φορτία.

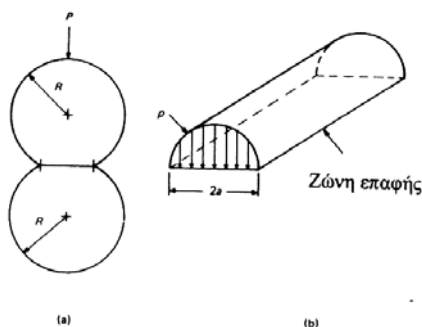
γ. Η τελική αστοχία της επιφάνειας είναι αποτέλεσμα διαδοχικών γεγονότων που δημιουργούνται στο δακτύλιο.

Δημιουργία ρωγμών, ανάπτυξη ρωγμών, σύμπλεξη ρωγμών και αποκοπή τμήματος.

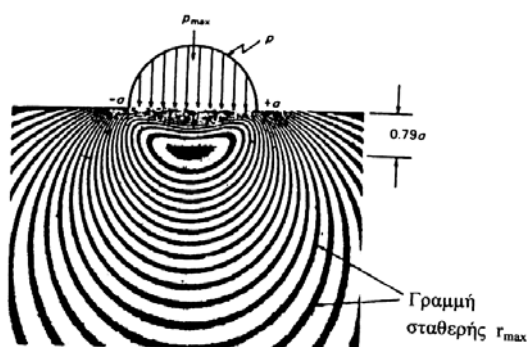
Οι πειραματικές παρατηρήσεις της κόπωσης επιφάνειας, δείχνουν ότι η μελέτη της κόπωσης είναι βασικά η μελέτη της συγκέντρωσης των τάσεων που σαν αποτέλεσμα έχουν την δημιουργία ρωγμών, σε συνδιασμό με την συμπεριφορά της μετάδοσης των ρωγμών.

Εφαρμογές φθοράς κόπωσης.

Θεωρούμε την επαφή μεταξύ δύο ομοίων κυλίνδρων κάτω υπό συνθήκες επιπέδου καταπόνησης. Μπορούμε να δούμε πως η συμπίεση των κυλίνδρων θα δώσει μια επίπεδο ορθογώνια ζώνη επαφής. Αν οι κύλινδροι δεν ήταν όμοιοι, η επαφή δεν θα ήταν επίπεδη αλλά και σ' αυτήν την περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί επίπεδη. Αυξάνοντας το φορτίο, το πλάτος της επαφής θα αυξηθεί και η παραμόρφωση στο κέντρο της επαφής θα είναι μεγαλύτερη από ότι στα άκρα, οπότε η πίεση επαφής μεταβάλλεται ανάλογα με την θέση από το κέντρο. Σχ. 3.3.1



Σχ. 3.3.1 Κατανομή πίεσης λόγω επαφής κυλίνδρου.



Σχ. 3.3.2 Ισοχρωματικές για επαφή κυλίνδρου και επιπέδου λόγω καθέτου φορτίου.

Συνεπώς για να υπολογίσουμε την τάση επί της επιφανείας, πρέπει να καθορίσουμε το μέγεθος της επαφής και την κατανομή της πίεσης εντός της επαφής για οιονδήποτε φορτίο.

Για δύο όμοιους ελαστικούς κυλίνδρους σε επαφή το φορτίο είναι P , (ανά μονάδα μήκους) και το πλάτος της είναι $2a$.

Η κατανομή της πίεσης είναι:

$$P = \frac{2P}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (1)$$

$$\text{Επίσης} \quad \alpha^2 = \frac{4PR(1-\nu^2)}{\pi E} \quad \text{όπου,}$$

E είναι ο συντελεστής Young και ν ο λόγος Poisson αντίστοιχα. Οι σχέσεις για p και α ανωτέρω ισχύουν για όμοιους και ανόμοιους κυλίνδρους εφόσον η γωνία που σχηματίζεται με κορυφή το κέντρο του κυλίνδρου και που βλέπει στο σημείο επαφής είναι μικρότερη από 30° . Εάν επίσης οι κύλινδροι είναι από διαφορετικό υλικό τότε ο συντελεστής Young γίνεται E^* όπου:

$$1/E^* = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2 \quad (2)$$

$$\text{και} \quad 1/R' = 1/R_1 + 1/R_2$$

$$\text{όπου:} \quad \alpha^2 = 4PR'/\pi E^*$$

Στην περίπτωση κυλίνδρου σε επίπεδο, όπου το επίπεδο έχει ακτίνα άπειρη, το R' γίνεται η ακτίνα του κυλίνδρου.

Είναι γνωστό πως κατά την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης η μεγίστη τάση διάτμησης του υλικού παίρνει μια τιμή K . Η μεγίστη διατμητική τάση σε συνθήκες επίπεδης καταπόνησης όταν η κατανομή της πίεσης δίδεται από την σχέση (1), όπως κατανέμεται στην επαφή από $-a$ μέχρι $+a$, δίδεται από τη σχέση:

$$\tau_{MAX} = \sqrt{\frac{(\sigma_X - \sigma_Z)^2}{4} + \tau_{XZ}^2} \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) ορίζει τις τιμές της τάσης τ_{max} σε όλα τα σημεία. Υπολογίζοντας την τιμή τ_{max} σε όλα τα σημεία κάτω από την επαφή των δύο σωμάτων παίρνουμε τις ισοχρωματικές του σχήματος της φωτοελαστικής επιπόνησης βλ. Σχ. 3.3.2

Η μεγαλύτερη τιμή του τ_{max} λαμβάνει χώρα σε βάθος $0,79a$ κάτω από την επιφάνεια, και βρίσκουμε πως η οριακή τιμή του K όπως αναφέρθηκε ανωτέρω λαμβάνει χώρα, όταν η μέγιστη πίεση στο κέντρο της επαφής $P_{MAX} = 3,3K$.

Καθώς το φορτίο αυξάνεται περαιτέρω, η πλαστική περιοχή θα αυξηθεί σε μέγεθος και τελικά θα κατανεμηθεί στην επιφάνεια οπότε μπορεί να λάβει χώρα πλαστική χαραγή. Αυτό συμβαίνει όταν η μέση πίεση είναι κατά προσέγγιση $6K$ δηλαδή διπλάσια από το σημείο εκείνο που έλαβε χώρα υποχώρηση (διαρροή). Η μέση πίεση σ' αυτό το σημείο είναι ουσιαστικά η τιμή της σκληρότητας εντομής H του υλικού, οπότε ως ισχύει για τα μέταλλα $H \cong 6K \cong 3\sigma_y$ όπου σ_y είναι το όριο διαρροής υλικού σε εφελκυσμό βλ. Σχ. 3.3.3

Εάν έχουμε και εφαπτόμενες δυνάμεις $F=\mu W$ όπου μ ο συντελεστής τριβής τότε η κατανομή της τάσης τ_{max} δίδεται στο Σχ. 3.3.4. Οπότε μπορούμε να δούμε πως το σημείο της μέγιστης διατμητικής τάσης είναι πιο κοντά στην επιφάνεια οπότε πιο εύκολα μπορεί να λάβει χώρα πλαστική παραμόρφωση απ' ότι στην προηγούμενη περίπτωση.

Μέχρις εδώ έχουμε ασχοληθεί με επαφές μεταξύ δύο κυλίνδρων δύο διαστάσεων αν και στην πράξη μας ενδιαφέρουν οι τρισδιάστατες. Κατά την επαφή μεταξύ δύο σφαιρών, το αποτύπωμα είναι κύκλος η κατανομή πίεσης είναι:

$$P = \left(\frac{3W}{2\pi a^2} \right) \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}}$$

όπου $a = \sqrt[3]{\frac{3WR}{8E^*}}$

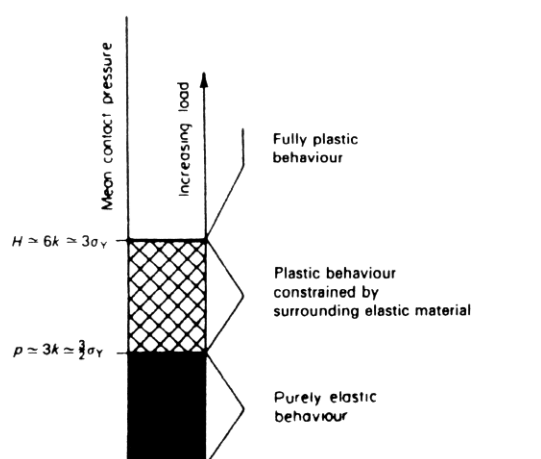
βλ. Σχ. 3.3.5

Αν και το αποτύπωμα για ανόμοιες σφαίρες δεν είναι μια επίπεδος κυκλική επαφή η εξίσωση (4) ανωτέρω ισχύει με αρκετή ακρίβεια αλλά σ' αυτήν την περίπτωση

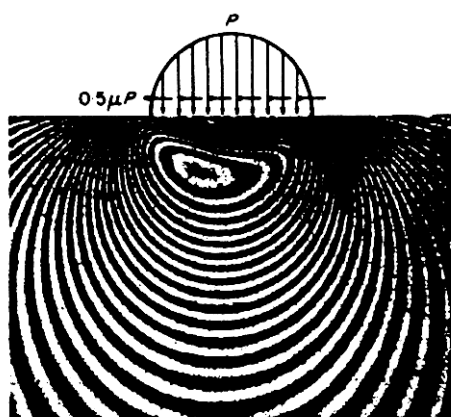
$$a = \sqrt[3]{\frac{3WR'}{4E^*}}$$

Για επαφή μεταξύ σφαίρας και επιπέδου η ακτίνα R' είναι απλώς η ακτίνα της σφαίρας.

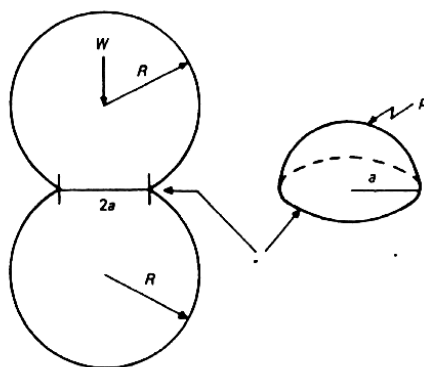
Γενικά η επαφή μεταξύ δύο καμπύλων επιφανειών δίδει ως αποτύπωμα μια έλλειψη λ.χ. στους ένσφαιρους τριβείς.



Σχ. 3.3.3

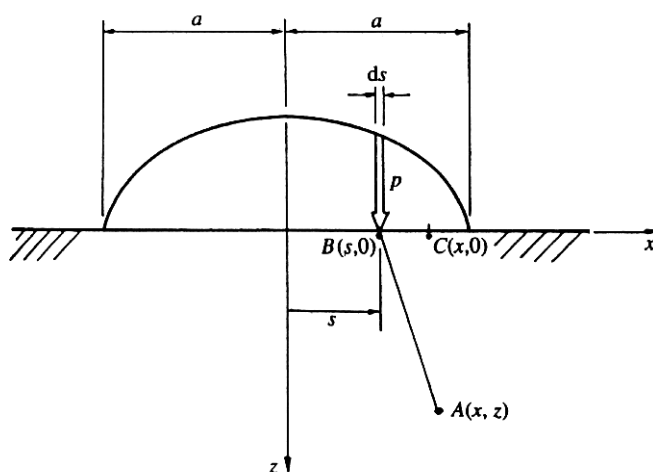


Σχ. 3.3.4



Σχ. 3.3.5

ΣΗΜ.: Στο Σχ. 3.3.6 κατωτέρω το φορτίο W πρέπει να κατανέμεται πάνω στην επιφάνεια επαφής σαν πίεση p . Η τιμή της πίεσης μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα x και η κατανομή της είναι επίσης συμμετρική γύρω από τον άξονα z .



Σχ. 3.3.6 Δυσδιάστατο συμμετρικά κατανεμημένο φορτίο εκτεινόμενο σε ταινία πλάτους $2a$.

Ένα τυπικό στοιχειώδες φορτίο που παριστάνεται ως pds φαίνεται να ενεργεί στο σημείο $B(s, 0)$.

Οι τάσεις στο σημείο A που οφείλονται σ' αυτή την γραμμική φόρτιση δίδονται από τους τύπους κατωτέρω:

$$\sigma_x = \frac{2z}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p(s)(x-s)^2 ds}{[(x-s)^2 + z^2]^2}$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p(s)ds}{[(x-s)^2 + z^2]^2}$$

$$\tau_{xz} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p(s)(x-s)ds}{[(x-s)^2 + z^2]^2}$$

Αυτό σημαίνει πως αν είναι γνωστό το σχήμα της κατανομής της πίεσης $p(s)$, η τάση σε οιονδήποτε σημείο του στερεού μπορεί να υπολογισθεί.

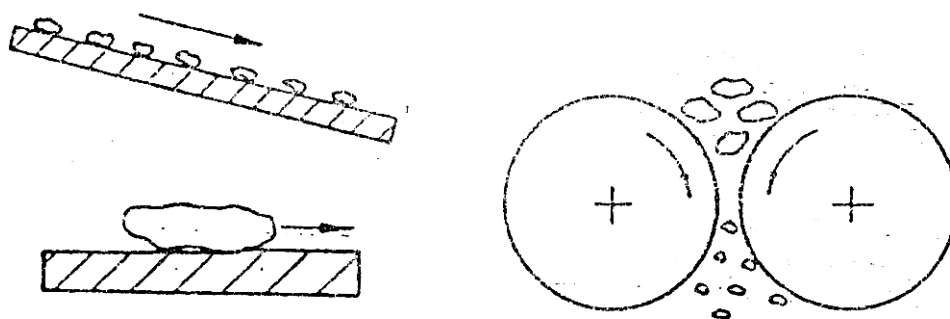
3.3. ΦΘΟΡΑ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

Το φαινόμενο της λείανσης το έχουμε όταν δύο σώματα έλθουν σε άμεση επαφή και η επιφάνεια του ενός είναι πολύ πιο σκληρή από την επιφάνεια του άλλου.

Η σκληρότερη επιφάνεια πιέζεται βίαια μέσα στην μαλακότερη, με ταυτόχρονη πλαστική ροή υλικού της μαλακότερης επιφάνειας γύρω από τα σημεία της κύριας επιφάνειας. Όταν αναπτυχθεί επαπτομενική κίνηση η σκληρότερη επιφάνεια θα κινηθεί οργώνοντας το μαλακότερο υλικό.

Στη βιομηχανία η φθορά λείανσης είναι πολύ διαδεδομένη. Υπολογίζεται ότι περίπου το 50% της φθοράς που έχουμε στις εγκαταστάσεις προέρχεται από φθορά λείανσης.

Σαν αποτέλεσμα της ποικιλίας των συνθηκών είναι να διακρίνουμε διάφορους τύπους φθοράς λείανσης στην πράξη. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4 κάνουμε διάκριση σε λείανση δύο σωμάτων και σε λείανση τριών σωμάτων. Για παράδειγμα η λείανση δύο σωμάτων συναντιέται συχνά στη μεταφορά ορυκτών χύμα, και η λείανση τριών σωμάτων κατά την κατεργασία των ορυκτών και κατά την είσοδο ξένου σώματος σε έδρανα.



Σχ. 3.4 Λείανση δύο σωμάτων και τριών σωμάτων.

Μπορούμε επίσης να κάνουμε διάκριση σε:

- Λείανση γλυφάνου. Παράδειγμα: φθορά φτυαριών, φθορά σφυριών σε μηχανισμό κρουστικού κονιορτοποιητή.
- Τροχιστική λείανση. Παράδειγμα: φθορά τροχιστικών δίσκων κ.λπ.

Η εξέταση του μηχανισμού φθοράς λείανσης στο εργαστήριο γίνεται με την εξέταση στερεών που γλυστρούν πάνω σε γυαλόχαρτο. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών είναι τα παρακάτω.

Σε δεδομένο καθεστώς φθοράς, η ποσότητα του μετάλλου V που χάθηκε από φθορά λείανσης, αυξάνεται τις περισσότερες φορές γραμμικά με το φορτίο F και την απόσταση ολίσθησης l .

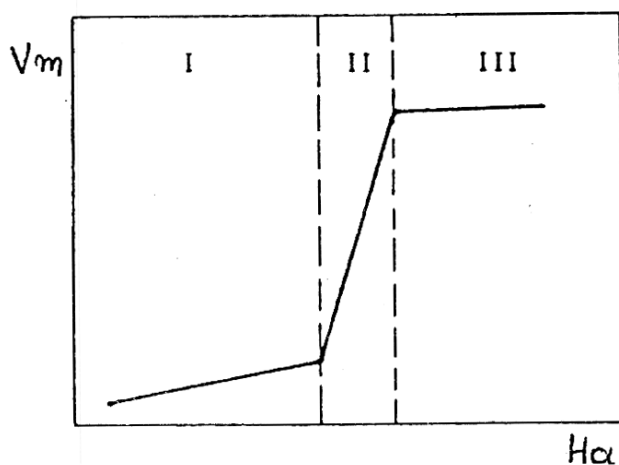
Δηλαδή: $V \sim F \cdot l$

Αν έχουμε απόκλιση οφείλεται συνήθως στην ελάττωση του μεγέθους των σωματιδίων ή σε στόμωμα της επιφάνειας.

Για να συγκρίνουμε την συμπεριφορά σε λείανση διαφόρων υλικών πρέπει να ορίσουμε τα παρακάτω μεγέθη.

- Τον όγκο της φθοράς V_m
- Την αντίσταση φθοράς $\varepsilon = \frac{1}{\text{όγκος φθοράς}} = \frac{1}{V_m}$
- Την σχετική αντίσταση φθοράς $\varepsilon_w = \frac{\varepsilon(\text{δοκιμίου})}{\varepsilon(\text{προτύπου})}$

Βρέθηκε ότι η φθορά λείανσης εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ της σκληρότητας του υλικού λείανσης (H_a) και της σκληρότητας του μετάλλου (H_m). Έτσι έχουμε τρεις καταστάσεις φθοράς όπως φαίνονται στο Σχ. 3.5



Σχ. 3.5

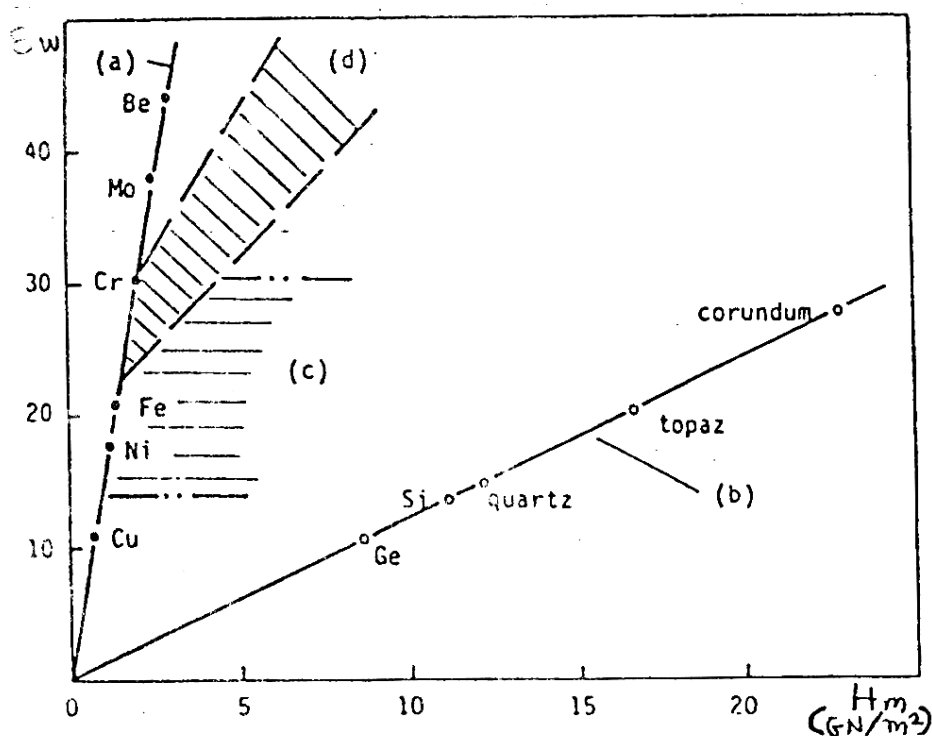
1. Κατάσταση χαμηλής φθοράς (περιοχή I) $H_a < H_m$
2. Μεταβατική κατάσταση (περιοχή II) $H_a \cong H_m$
3. Κατάσταση υψηλής φθοράς (περιοχή III) $H_a > H_m$

Αυτό οδηγεί στο σημαντικό συμπέρασμα ότι για να ελαττώσουμε τη φθορά λείανσης, η σκληρότητα του υλικού H_m πρέπει να είναι μεγαλύτερη της σκληρότητας του υλικού λείανσης H_a κατά 1,3. Δηλαδή:

$$H_m \cong 1,3H_a \quad (3.3.1)$$

Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο για το όριο χαμηλής φθοράς. Δεν είναι απαραίτητο να αυξήσουμε τη σκληρότητα του υλικού πέρα από την τιμή που ορίζεται από τη σχέση (3.3.1) γιατί δεν έχουμε καμία αξιολογή βελτίωση της φθοράς.

Για να προσδιορίσουμε τις ιδιότητες υλικών στις συνθήκες υψηλής φθοράς (III), ένας μεγάλος αριθμός υλικών δοκιμάστηκε.



Σχ. 3.6

Στο Σχ. 3.6 η σχετική αντίσταση φθοράς ε_w δίνεται σχηματικά σε σχέση με την σκληρότητα του H_m .

Οι μετρήσεις έγιναν κάτω από συνθήκες υψηλής φθοράς. Τα δεδομένα τα πήραμε χρησιμοποιώντας σαν υλικό λείανσης ηλεκτρολυτικά παραγόμενο

κορούνδιο ($H = 22,9 \text{ GN/m}^2$) και σαν πρότυπο ένα κράμα μολύβδου – κασσιτέρου που περιέχει και αντιμόνιο.

Η σκληρότητα των υλικών υπολογίστηκε πριν το πείραμα με διαμάντι.

Τα βασικά συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε από το διάγραμμα του Σχ. 3.6 είναι τα παρακάτω:

- α. Τεχνολογικά καθαρά μέταλλα ανοπτυμένα και ανοπτυμένοι χάλυβες έχουν σχετική αντίσταση φθοράς ε_w ευθέως ανάλογη με τη σκληρότητα H_m .

$$\varepsilon_w = C_{\mu\tau} \cdot H_m$$

όπου $C_{\mu\tau} = 13,8 \cdot 10^{-3} \cdot \text{N}^{-1} \text{mm}^2$

- β. Για τα μη μεταλλικά σκληρά υλικά και ορυκτά υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της σχετικής αντίστασης φθοράς και της σκληρότητας.

$$\varepsilon_w = C_{op} \cdot H_m$$

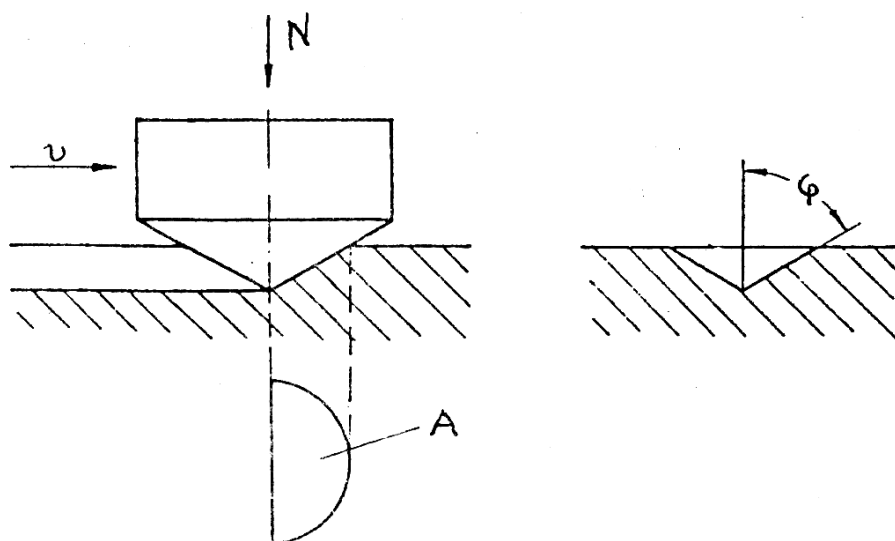
όπου $C_{op} = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{N}^{-1} \text{mm}^2$

- γ. Για μέταλλα που από πλαστική παραμόρφωση έχουν υποστεί σκλήρυνση εν ψυχρώ η σχετική αντίσταση φθοράς ε δεν εξαρτάται από την σκληρότητα που προέκυψε από την σκλήρυνση εν ψυχρώ.

- δ. Η θερμική κατεργασία των μετάλλων βελτιώνει την αντίστασή τους σε φθορά λείανσης.

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν τη μεγάλη σημασία της σκληρότητας των υλικών στην αντίστασή τους στην φθορά λείανσης.

Την γραμμική σχέση μεταξύ της αντίστασης σε φθορά λείανσης και σκληρότητας υλικού μπορούμε να επαληθεύσουμε χρησιμοποιώντας το μοντέλο όργωσης του Σχ. 3.7



Σχ. 3.7

Σε αυτό το μοντέλο το όργανο λείανσης είναι ένας κώνος που οργώνει και αφαιρεί υλικά από την επιφάνεια.

Το φορτίο N ισορροπεί από την πίεση παραμόρφωσης P_y που αναπτύσσεται στο μπροστινό μισό του κώνου.

Έτσι αν A η επιφάνεια επαφής:

$$N = A \cdot P_y \Rightarrow N = \frac{1}{8} \pi \cdot d^2 \cdot P_y \quad (3.3.2.)$$

Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται με την ολίσθηση κατά διάστημα l είναι:

$$V = \frac{d^2}{4} \cdot l \cdot \sigma \phi \phi \quad (3.3.3.)$$

Διαιρώντας κατά μέλη την (3.3.3.) με την (3.3.2.) έχουμε:

$$\frac{V}{N} = \frac{2\sigma\phi\phi \cdot l}{\pi \cdot P_y} \Rightarrow V = \frac{2\sigma\phi\phi \cdot l}{\pi \cdot P_y} \cdot N \quad (3.3.4.)$$

Η (3.3.4.) δείχνει ότι ο όγκος φθοράς V είναι ανάλογος με το φορτίο N και το μήκος ολίσθησης.

Την μόνη ιδιότητα του υλικού που βρίσκουμε στη σχέση, είναι η πίεση παραμόρφωσης P_y .

Αν θεωρήσουμε ότι η πίεση παραμόρφωσης είναι ίση με τη σκληρότητα, τότε για δοσμένο φορτίο και μήκος ολίσθησης έχουμε:

$$V = C \cdot \frac{1}{H}$$

όπου C = σταθερά.

Επειδή η αντίσταση φθοράς είναι αντιστρόφως ανάλογη του όγκου φθοράς έχουμε:

$$\varepsilon \cong C \cdot H$$

Από τα παραπάνω και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που φαίνονται στο Σχ. 3.6 γίνεται αντιληπτό ότι η αντίσταση στη φθορά λείανσης εξαρτάται μόνο από την σκληρότητα. (στην πράξη το φορτίο και το μήκος ολίσθησης είναι δεδομένο).

Πρέπει να λάβουμε όμως υπόψη ότι όλα όσα αναφέραμε ισχύουν στην περίπτωση υψηλής φθοράς.

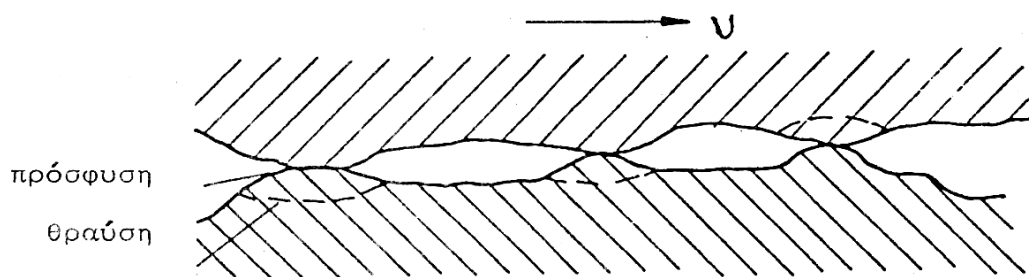
Αν η διαδικασία της φθοράς λείανσης γίνεται σε επιφανειακά στρώματα των σωμάτων τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση στη φθορά των ακαθαρσιών της επιφάνειας και της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας.

3.4. ΦΘΟΡΑ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ

Ενώ ο μηχανισμός της φθοράς στην κόπωση επιφάνειας και στη λείανση οφείλεται κατά κύριο λόγο στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και τάσεις και στη διαδικασία της παραμόρφωσης, στη φθορά πρόσφυσης το σημαντικότερο λόγο έχουν οι αλληλοεπιδράσεις των υλικών.

Όταν δύο σώματα στερεά έρχονται σε επαφή, υφίστανται την επίδραση δυνάμεων VAN DER WAALS. Έτσι σχηματίζονται ισχυρές συνδέσεις πρόσφυσης.

Για να έχουμε φθορά πρόσφυσης θα πρέπει να λάβει χώρα θραύση στην επιφάνεια του ενός ή και των δύο σωμάτων. Η κατάσταση αυτή φαίνεται σχηματικά στο Σχ. 3.8



Σχ. 3.8

Ενώ στις άλλες περιπτώσεις φθοράς απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα για να φθάσουμε σε ένα βαθμό που θα έχουμε τη φθορά, στη φθορά πρόσφυσης αυτό γίνεται απότομα.

Ο μηχανισμός της φθοράς πρόσφυσης εξαρτάται από τις παραμέτρους της πρόσφυσης και της θραύσης.

Επειδή, τόσο η πρόσφυση όσο και η θραύση εξαρτώνται από τις ακαθαρσίες της επιφάνειας και την επίδραση του περιβάλλοντος, είναι πολύ δύσκολο να βρούμε σχέσεις μεταξύ των μεγεθών της πρόσφυσης και των ιδιοτήτων των υλικών.

Στο κενό, όπου αυτοί οι παράγοντες εξαλείφονται παρατηρήθηκαν τα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα που έχουν γενική αξία για την διαδικασία της φθοράς πρόσφυσης σε ζεύγος μετάλλου με μέταλλο.

1. Δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της διαλυτότητας των μετάλλων και των δεσμών πρόσφυσης που δημιουργούνται μεταξύ τους.
2. Η κρυσταλλική δομή των μετάλλων επιδρά στη φθορά πρόσφυσης. Τα μέταλλα με εξαγωγική δομή παρουσιάζουν χαμηλότερη φθορά πρόσφυσης από τα μέταλλα με εδροκεντρομένη κυβική ή χωροκεντρομένη κυβική δομή. Αυτή η διαφορά πιστεύεται ότι έχει σχέση με τους διαφορετικούς

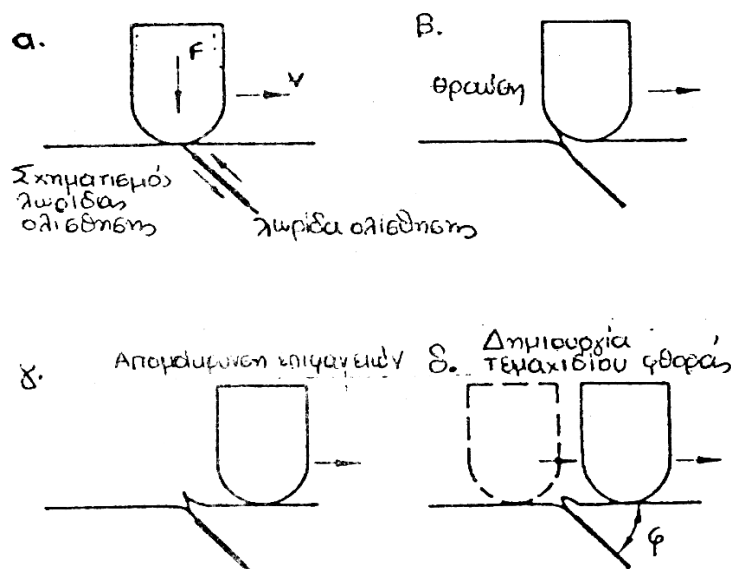
τύπους πλαστικής παραμόρφωσης, που δημιουργούνται και με τον αριθμό των δρώντων ολισθήσεων στην κρυσταλλική δομή.

3. Ο προσανατολισμός των κρυστάλλων επιδρά στην συμπεριφορά τους κατά την φθορά πρόσφυσης. Γενικά, προσανατολισμοί κόκκων για μεγάλη πυκνότητα ατόμων και χαμηλή επιφανειακή ενέργεια, παρουσιάζουν χαμηλότερη πρόσφυση και μικρότερη φθορά πρόσφυσης από ότι άλλοι προσανατολισμοί.
4. Όταν δύο ανόμοια μέταλλα έρθουν σε επαφή, σαν αποτέλεσμα της φθοράς πρόσφυσης γενικά, θα έχουμε μεταφορά κομματιών από το μέταλλο με τη μικρότερη συνοχή προς αυτό με τη μεγαλύτερη συνοχή.
5. Μικρή ποσότητα στοιχείων (λίγα στο εκατομμύριο), όπως ο άνθρακας και θείο, είναι αρκετά για να περιορίζουν την φθορά πρόσφυσης. (Το θείο και ο άνθρακας ενεργοποιούνται από την θερμότητα τριβής και διαχέονται στην επιφάνεια όπου δημιουργούν μεγαλύτερη συγκέντρωση από ότι στον κορμό).

Η συνδιασμένη ενέργεια της πρόσφυσης και της θραύσης έχουν σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό των τεμαχιδίων της φθοράς πρόσφυσης.

Πειράματα πάνω στη δημιουργία των σωματιδίων κατά τη φθορά πρόσφυσης έγιναν από τον BUCKLEY. Ο ερευνητής έκανε πειράματα ολισθαίνοντας σώμα πολυκρυσταλλικού χαλκού πάνω σε επιφάνεια δικρύσταλλου χαλκού.

Με ένα απλό πείραμα είχαμε δημιουργία ρωγμών πάνω στην επιφάνεια του δικρύσταλλου. Εξέταση των ρωγμών έδειξε ότι τα τοιχώματα είναι πολύ λεία και το άκρο της ρωγμής στην επιφάνεια κατσαρώνει. Η μέτρηση της γωνίας μεταξύ της ρωγμής και της επιφάνειας έδειξε ότι η θραύση έγινε κατά μήκος μιας λωρίδας ολίσθησης. Στο Σχ. 3.9 φαίνεται ο μηχανισμός δημιουργίας της ρωγμής.



Σχ. 3.9

Στην αρχή έχουμε τη δημιουργία πρόσφυσης μεταξύ των δύο σωμάτων (α). Με την επαπτόμενη κίνηση έχουμε τη δημιουργία θραύσεων κατά μήκος λωρίδων ολίσθησης (β).

Όταν η επαπτόμενη δύναμη υπερβεί τη δύναμη του δεσμού πρόσφυσης έχουμε απομάκρυνση των επιφανειών των δύο σωμάτων, με ταυτόχρονη δημιουργία ρωγμών με κατσαρό άκρο στην επιφάνεια του δικρύσταλλου (γ).

Με ένα δεύτερο πέραςμα έχουμε απόσπαση του κατσαρωμένου κομματιού και δημιουργία του τεμαχιδίου της φθοράς πρόσφυσης.

3.5. ΦΘΟΡΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Στη φθορά χημικής διάβρωσης, η φθορά είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο σωμάτων που έρχονται σε επαφή και του περιβάλλοντος.

Αν οι δύο επιφάνειες αντιδρούν ενεργά με το περιβάλλον, η τριβή των επιφανειών μεταξύ τους έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή απομάκρυνση των προϊόντων της αντίδρασης με το περιβάλλον. Καθώς τα προϊόντα της αντίδρασης περιέχουν και υλικά από τις επιφάνειες, έχουμε απομάκρυνση ύλης από τις επιφάνειες.

Στην περίπτωση της φθοράς χημικής διάβρωσης ο όλος μηχανισμός μπορεί να ερμηνευθεί με την αλληλεπίδραση τριών παραγόντων, των στερεών επιφανειών α και β και του περιβάλλοντος γ. Η αλληλεπίδραση αυτή περιγράφεται με την παρακάτω κυκλική διαδικασία.

1. Στο πρώτο στάδιο οι επιφάνειες α και β αντιδρούν με το περιβάλλον γ. Τα προϊόντα της αντίδρασης των α,γ και β,γ σχηματίζονται στις επιφάνειες των α και β αντίστοιχα.
2. Στο δεύτερο στάδιο έχουμε τη φθορά των προϊόντων αντίδρασης. Όταν συμβεί αυτό, νέα επιφάνεια δημιουργείται σε κάθε σώμα που αντιδρά με το περιβάλλον και έτσι επαναλαμβάνεται το πρώτο στάδιο.

Σαν αποτέλεσμα της θερμικής και μηχανικής ενεργοποίησης τα σώματα υφίστανται τις παρακάτω αλλαγές:

- Η αντίδραση αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και ο σχηματισμός του επιφανειακού στρώματος επιταχύνεται.
- Οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων αλλάζουν. Γενικά έχουμε μια τάση για ψαθυρή θραύση.

Για να μελετήσουμε το φαινόμενο της φθοράς χημικής διάβρωσης, εκτός από τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης και της πρόσφυσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και η Χημεία των αλληλεπιδρόμενων επιφανειών καθώς και την κατανομή της ενέργειας τριβής.

3.6. ΦΘΟΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ορίζουμε σαν φθορά μηχανικής διάβρωσης, την διαδικασία απομάκρυνσης υλικού από επιφάνεια σώματος, εξαιτίας της βίαιας πρόσκρουσης σε αυτό στερεών ή υγρών σωματιδίων.

Παράδειγμα φθοράς μηχανικής διάβρωσης είναι η φθορά που υφίστανται τα βράχια από τα κύματα της θάλασσας όπως επίσης η φθορά που βλέπουμε σε αρχαία κτίσματα από τις αμμοθύελλες. Στο χώρο της Μηχανολογίας παράδειγμα φθοράς μηχανικής διάβρωσης είναι η φθορά που υφίστανται οι αεροστρόβιλοι από την πρόσκρουση σε αυτούς σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

Για τη μελέτη του φαινομένου της φθοράς μηχανικής διάβρωσης έχουν γίνει πειράματα με τη χρησιμοποίηση επιφανειών από υλικά που θέλουμε να μελετήσουμε που πάνω τους γίνεται βίαιη πρόσκρουση σωματιδίων (π.χ. ατσάλινα σφαιρίδια ή αμμοβολή).

Η ταχύτητα των σωματιδίων που προσκρούουν έφτασε και μέχρι 10^5 m/sec .

Από τα πειράματα αυτά βρέθηκαν ότι παράγοντες που επιδρούν στη φθορά μηχανικής διάβρωσης είναι:

- Η ταχύτητα της πρόσκρουσης.
- Η μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού.
- Τα χαρακτηριστικά των προσκρούόμενων σωματιδίων όπως, το σχήμα, το μέγεθος και η σκληρότητά τους.

3.7. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

Αν θελήσουμε να εξετάσουμε τα είδη φθοράς που αναφέραμε σε σχέση με τη δυσκολία αντιμετώπισής τους, βλέπουμε ότι:

- α. Η φθορά χημικής διάβρωσης μπορεί συνήθως να αντιμετωπισθεί με την κατάλληλη εκλογή υλικών και με τη σωστή μέθοδο προστασίας της επιφάνειας.
- β. Η φθορά μηχανικής διάβρωσης μπορεί να αντιμετωπισθεί με την εκλογή αρκετά σκληρών υλικών και την αποφυγή της πρόσκρουσης σκληρών σωματιδίων στην επιφάνεια.
- γ. Τη φθορά κόπωσης επιφανείας κυλιόμενων επαφών μπορούμε να αντιμετωπίσουμε με την κατάλληλη εκλογή υλικού, με τη θερμική κατεργασία, με το φινίρισμα της επιφάνειας και με τη χρησιμοποίηση των καταλλήλων επιπέδων καταπονήσεων.

- δ. Τη φθορά λείανσης, όταν δεν υπάρχει φθορά πρόσφυσης, μπορούμε να την ελαττώσουμε κάνοντας τις επιφάνειες επαφής αρκετά λείες και παρεμποδίζοντας την είσοδο σκληρών ξένων σωματιδίων. (π.χ. κάνοντας σωστό φιλτράρισμα του λιπαντικού). Η φθορά λείανσης που αναπτύσσεται σαν αποτέλεσμα προγενέστερης φθοράς πρόσφυσης είναι ένα πολύ πολύπλοκο θέμα.
- ε. Η φθορά πρόσφυσης είναι το πιο δύσκολο είδος φθοράς, τόσο για μελέτη, όσο και για έλεγχο. Η κατάλληλη εκλογή υλικών και η σωστή λίπανση μπορούν να περιορίσουν την φθορά.

Όπως βλέπουμε καθώς προχωρούμε από τη φθορά χημικής διάβρωσης προς τη φθορά πρόσφυσης, τα διάφορα είδη φθοράς γίνονται όλο και δυσκολότερα στην αντιμετώπισή τους.

Εφαρμογές επεξεργασίας επιφανείας.

Σκλήρωση επιφανείας (Σχ. 3.10, 3.11): Συμπεριλαμβάνει μεθόδους όπως ενανθράκωση, εναζώτωση, ενδοκυάνωση, σκλήρωση με φλόγα, σκλήρωση με επαγωγή κ.λπ. Ακτίνες laser χρησιμοποιούνται επίσης ως πηγές θερμότητας για την επιφανειακή σκλήρωση μετάλλων και κεραμικών. Η σκλήρωση επιφανείας εισάγει παραμένουσες τάσεις στις επιφάνειες. Ο σχηματισμός μαρτενσίτη προκαλεί παραμένους τάσεις συμπίεσης στις επιφάνειες. Αυτές οι τάσεις είναι επιθυμητές διότι βελτιώνουν τον χρόνο κόπωσης με το να καθυστερούν την έναρξη των ρωγμών στα εξαρτήματα.

Θερμικός καταιωνισμός (Σχ.3.12): Μ' αυτήν την μέθοδο επικαλύψεις όπως διάφορα μέταλλα και κράμματα, καρβίδια και κεραμικά εφαρμόζονται στις μεταλλικές επιφάνειες με κάποιον εκτοξευτήρα υπό μορφή ρεύματος οξυγόνου – καυσίμου, ηλεκτρικό τόξο, πλάσμα κ.λπ. Το υλικό επικάλυψης μπορεί να είναι υπό μορφή σύρματος, ράβδου ή σκόνης, και τα σταγονίδια ή τα σωματίδια κτυπούν τις επιφάνειες προς επικάλυψη με ταχύτητες της τάξης των 100-1200 m/s. Οι επιφάνειες που θα υποστούν καταιωνισμό πρέπει να καθαρισθούν και εκτραχυνθούν για βελτίωση της αντοχής του δεσμού, που εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη διαδικασία και τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές. Η δομή της επικάλυψης μπορεί να είναι στρωματική και μπορεί να φέρει πόρους μέχρι 20% εξαιτίας του αέρα, και σωματίδια οξειδίων εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται.

Κατηγορίες: Πλάσματος: είτε συμβατικό, ή υψηλής ενέργειας, ή κενού. Αναπτύσσονται θερμοκρασίες 8.300° C και πολύ καλή αντοχή δεσμού με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε οξείδια.

Εκπυρσοκρότηση: όπου ελεγχόμενη έκρηξη λαμβάνει χώρα κάνοντας χρήση οξυγόνου – καυσίμου.

Υψηλής ταχύτητας οξυγόνου – καυσίμου: καταιωνισμός αερίου μεγάλης απόδοσης ανάλογης της εκπυρσοκρότησης.

Τόξου σύρματος: όπου τόξο σχηματίζεται μεταξύ δύο αναλίσκομένων ηλεκτροδίων, δίνει πολύ καλή αντοχή δεσμού και είναι η φθηνότερη.

Καταιωνισμός σύρματος φλόγας: όπου η φλόγα οξυγόνου – καυσίμου λειώνει το σύρμα και το εναποθέτει στην επιφάνεια, σχηματίζεται δεσμός μεσαίας αντοχής, και η διαδικασία είναι φθηνή.

Εναπόθεση ατμού: είναι μια διαδικασία στην οποία το υπόστρωμα υπόκειται σε χημικές αντιδράσεις με αέρια που περιέχουν ενώσεις των υλικών που πρόκειται να εναποτεθούν για να δώσει ένα στρώμα λίγων μικρών. Τα υλικά που εναποτίθενται μπορεί να είναι μέταλλα, κράμματα, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, κεραμικά ή άλλα οξειδία. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι μέταλλο, κράμα, πλαστικό, χαρτί, ή γυαλί. Τυπικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν κοπτικά εργαλεία, τρυπάνια, γλύφανα, φραζοδράπανα, καλούπια, έμβολα κοίλανσης και επιφάνειες που υπόκεινται σε φθορά. Η φυσική και η χημική εναπόθεση ατμών παρέχουν αποτελεσματικό έλεγχο της σύστασης της επικάλυψης, του πάχους και του αριθμού των πόρων.

Φυσική εναπόθεση ατμού (Σχ. 3.13, 3.18): εν κενώ η εξάτμιση τόξου, πιτσίλισμός, και εναπόθεση ιόντων.

Κατά την εν κενώ εξάτμιση το μέταλλο που πρόκειται να εναποτεθεί εξατμίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες εν κενώ και εναποτίθεται στο υπόστρωμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου ή λίγο υψηλότερα. Ομοίομορφες επικαλύψεις μπορεί να σχηματισθούν σε πολύπλοκα σχήματα. Με την μέθοδο εξάτμισης τόξου το υλικό επικάλυψης (κάθοδος) εξατμίζεται με την βοήθεια ενός αριθμού εξατμιστών χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά τόξα που δίνουν πλάσμα συνιστώμενο από ιονισμένο ατμό του υλικού προς επικάλυψη. Ο ατμός συμπυκνώνει στο υπόστρωμα (άνοδος) και το επικαλύπτει. Στις εφαρμογές αυτής της μεθόδου συμπεριλαμβάνονται επικαλύψεις ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες που είναι επίσης ανθεκτικές στην οξειδωση.

Μέθοδος sputtering (Σχ. 3.14): σ' αυτήν ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί ιονισμό αδρανούς αερίου (συνήθως αργού). Τα θετικά ιόντα βομβαρδίζουν το υλικό επικάλυψης (κάθοδος) και προκαλούν sputtering (εξαγωγή) των ατόμων. Αυτά τα άτομα κατόπιν συμπυκνούνται επί του κομματιού που θερμαίνεται προκειμένου να βελτιωθεί ο δεσμός. Με την μέθοδο του αντιδραστικού sputtering, το αδρανές αέριο αντικαθίσταται από ένα αντιδραστικό αέριο, όπως το οξυγόνο, που σ' αυτήν την περίπτωση τα άτομα οξειδώνονται και εναποτίθενται τα οξειδία. Καρβίδια και νιτρίδια επίσης εναποτίθενται με αντιδραστικό sputtering. Πολύ λεπτές επικαλύψεις πολυμερούς μπορεί να εναποτεθούν σε μεταλλικά και πολυμερή υποστρώματα με το αντιδραστικό αέριο να προκαλεί πολυμερισμό του πλάσματος.

Εναπόθεση ιόντων (Σχ. 3.15): είναι συνδυασμός πιτσίλισματος και εξάτμισης εν κενώ. Ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια εκκένωση αναλαμπής δημιουργώντας κάποιο πλάσμα. Τα άτομα που έχουν υποστεί εξάτμιση σ' αυτήν την διαδικασία έχουν ιονισθεί μερικώς.

Χημική εναπόθεση ατμών (Σχ. 3.16, 3.17): είναι μια θερμοχημική διαδικασία. Σε μια τυπική εφαρμογή όπως κατά την επικάλυψη κοπτικών εργαλείων με νιτρίδιο του τιτανίου (TiN), τα εργαλεία τοποθετούνται σε έναν δίσκο γραφίτου και θερμαίνονται στους 950-1050° C σε ατμοσφαιρική πίεση σε μια αδρανή ατμόσφαιρα. Το τετραχλωρίδιο του τιτανίου (ατμός), υδρογόνο και άζωτο, εισάγονται μετέπειτα μέσα στον θάλαμο. Οι χημικές αντιδράσεις σχηματίζουν νιτρίδιο του τιτανίου στις επιφάνειες του εργαλείου. Για την επικάλυψη με καρβίδιο του τιτανίου, το μεθάνιο αντικαθιστά τα αέρια.

Οι επικαλύψεις με χημική εναπόθεση ατμών είναι συνήθως πιο παχείς από αυτές που λαμβάνονται με φυσική εναπόθεση ατμών. Ένα τυπικό κύκλο για χημική εναπόθεση ατμών είναι μακροχρόνιο και συνίσταται τρεις ώρες θέρμανση, τέσσερις ώρες επικάλυψη, και έξι έως οκτώ ώρες ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Το πάχος της επικάλυψης εξαρτάται από την παροχή των αερίων που χρησιμοποιούνται, τον χρόνο και την θερμοκρασία. Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή επικαλύψεων διαμαντιού.

Εμφύτευση ιόντων: καθώς η ενέργεια των ατόμων ή ιόντων που χτυπούν την επιφάνεια αυξάνεται, αυξάνει και ο βαθμός ενδοδιάχυσης και ανάμιξης μεταξύ των ατόμων της επικάλυψης και των επιφανειακών στρωμάτων του υποστρώματος. Εάν ιόντα υψηλής ενεργείας χτυπούν κάποια επιφάνεια μπορούν να διεισδύσουν σε κάποιο βάθος και να αλλάξουν τις ιδιότητες του υλικού. Είναι μια μέθοδος τροποποίησης της επιφανείας. Τα χρησιμοποιούμενα ιόντα είναι κυρίως N^+ , N^{2+} , C^+ και B^+ , καθώς και τα μεταλλικά ιόντα: Ti^+ , Al^+ και Y^+ . Οι ενέργειές των είναι της τάξης των 50 μέχρι 200 KeV, δίδοντας βάθη διείσδυσης μικρότερα των 1μm. Εξαιτίας του μικρού βάθους του υλικού που επηρεάζεται από την εμφύτευση των ιόντων, αυτή η διαδικασία προκαλεί αμελητέα αλλαγή στις διαστάσεις ή το φινίρισμα της επιφανείας του υποστρώματος. Μπορεί να εφαρμοσθεί στα κεραμικά, στα μέταλλα και τα κεραμομέταλλα.

Η εμφύτευση των ενεργητικών ιόντων αλλάζει την δομή της επιφανείας με δύο τρόπους: Μέσω της εισαγωγής των ειδών εμφύτευσης που σχηματίζουν στερεό διάλυμα ή ένωση, και λόγω καταστροφής από ακτινοβολία δηλ. διαφοροποιείται η δομή λόγω της μετατόπισης των ατόμων, από τις συγκρούσεις των ιόντων.

Η εμφύτευση ιόντων μειώνει σε πολλά υλικά τον βαθμό φθοράς λόγω ολίσθησης. Σε κάποια μέταλλα μειώνεται η τριβή και συνεπώς η φθορά λόγω μείωσης των εφαπτομενικών δυνάμεων κατά την ολίσθηση.

Σαν παράδειγμα αναφέρεται πως η εμφύτευση ιόντων Ti^+ μειώνει τον συντελεστή τριβής σε έδρανο ολίσθησης από χάλυβα από 0,6 σε 0,3, πιθανώς με τροποποίηση της σύνθεσης της επιφανείας, τα χαρακτηριστικά οξειδώσεώς της και την φύση του σχηματιζόμενου οξειδίου. Επίσης μειώνεται και ο βαθμός φθοράς.

Εν τούτοις, εμφύτευση ιόντων N^+ μειώνει επίσης τον βαθμό φθοράς των σχετικά ελατών χαλύβων (αν και όχι των σκληρών μαρτενσιτικών χαλύβων), αν και δεν προκαλούν ελάττωση της τριβής. Σ' αυτήν την περίπτωση ο κύριος

λόγος της αυξανόμενης αντίστασης στην φθορά είναι πιθανόν οι αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων κοντά στην επιφάνεια, και ιδιαίτερα σκληρότης και βαθμός καταπόνησης από σκλήρωση. Μετρήσεις μικροσκληρότητας σε πολύ μικρά φορτία έχουν εμφανίσει αυξήσεις στην επιφανειακή σκληρότητα χαλύβων με εμφυτευμένο N^+ από 50 μέχρι 100%. Χάλυβες που περιέχουν σχηματιστές νιτριδίων (π.χ. αλουμίνιον, χρώμιον ή βανάδιον) παρουσιάζουν μεγαλύτερη επίδραση από άλλους. Ένα άλλο αποτέλεσμα της εμφύτευσης ιόντων που μπορεί να συντελέσει σε βελτίωση της τριβολογικής συμπεριφοράς είναι η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων συμπίεσης στην επιφάνεια.

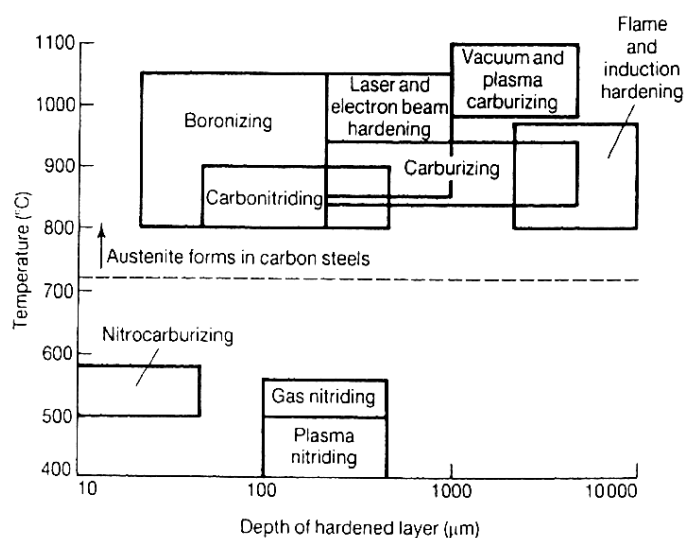
Επιμετάλλωση: Προσδίδει αντίσταση στην φθορά και την διάβρωση, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλύτερη εμφάνιση και ανακλαστικότητα.

Κατά την ηλεκτροεπιμετάλλωση το κομμάτι (κάθοδος) επιμεταλλώνεται με κάποιο διαφορετικό μέταλλο (άνοδος) ενώ και τα δύο βρίσκονται σε κάποιο διάλυμα ηλεκτρολύτη υδατικής βάσης. Βασικά τα μεταλλικά ιόντα από την άνοδο απομακρύνονται κάτω από την διαφορά δυναμικού εξωτερικής πηγής ενώνονται με τα ιόντα του διαλύματος και εναποτίθενται στην κάθοδο.

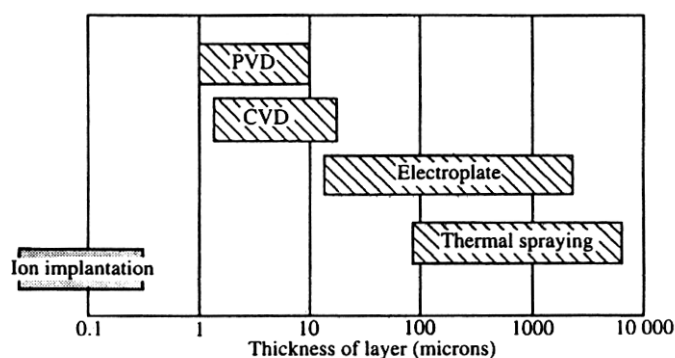
Όλα τα μέταλλα μπορεί να επιμεταλλωθούν σε πάχος από μερικά ατομικά στρώματα μέχρι 0,05 mm.

Κοινά υλικά επιμετάλλωσης είναι το χρώμιο, το νικέλιο, το κάδμιο, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και ο κασσίτερος. Επιμετάλλωση με χρώμιο λαμβάνει χώρα, επιμεταλλώνοντας πρώτα το υπόστρωμα με χαλκό μετά με νικέλιο και μετά με χρώμιο. Επιμετάλλωση σκληρού χρωμίου λαμβάνει χώρα κατ' ευθείαν πάνω στο βασικό μέταλλο για να επιτευχθεί σκληρότητα 70 HRC. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την βελτίωση στην αντίσταση στην φθορά και την διάβρωση, εργαλείων, στελεχών βανών, υδραυλικών αξόνων, χιτωνίων μηχανών ντήζελ και αεροπλάνων και για το γέμισμα φθαρμένων κομματιών.

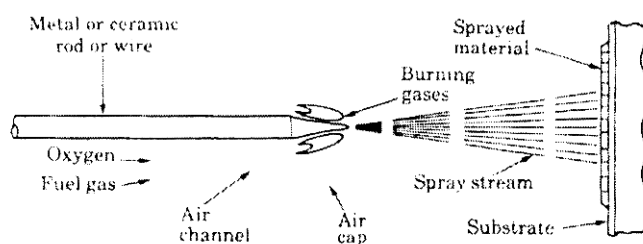
Επιμετάλλωση απουσία ρεύματος: λαμβάνει χώρα με χημικές αντιδράσεις χωρίς εξωτερική πηγή ηλεκτρισμού. Η περισσότερο συνήθης εφαρμογή χρησιμοποιεί το νικέλιο, αν και ο χαλκός χρησιμοποιείται επίσης. Το χλωρίδιο του νικελίου (ένα μεταλλικό άλας) ανάγεται με υποφωσφορώδες νάτριο, ως αναγωγικό φορέα, σε μεταλλικό νικέλιο που αργότερα εναποτίθεται στο κομμάτι. Η σκληρότητα του επιμεταλλωμένου νικελίου κυμαίνεται από 425 HV μέχρι 575 HV και μπορεί να επεξεργασθεί θερμικά μέχρι 1000 HV. Η επίστρωση νικελίου παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στην φθορά και την οξείδωση.



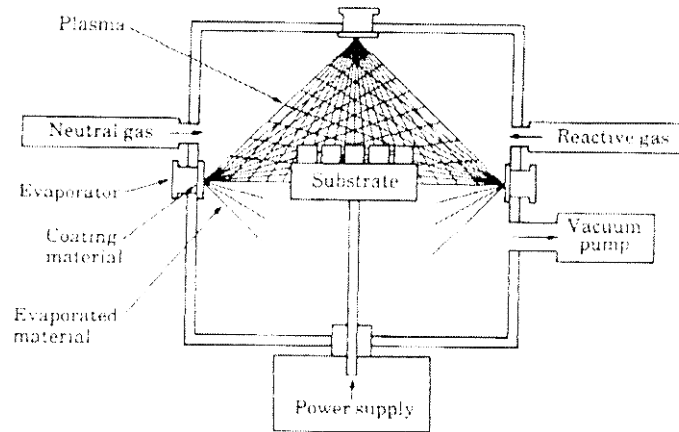
Σχ. 3.10 Σύγκριση της θερμοκρασίας και του βάθους στις σκλήρωσης
 διαφόρων μεθόδων τροποποίησης επιφανείας χαλύβων.



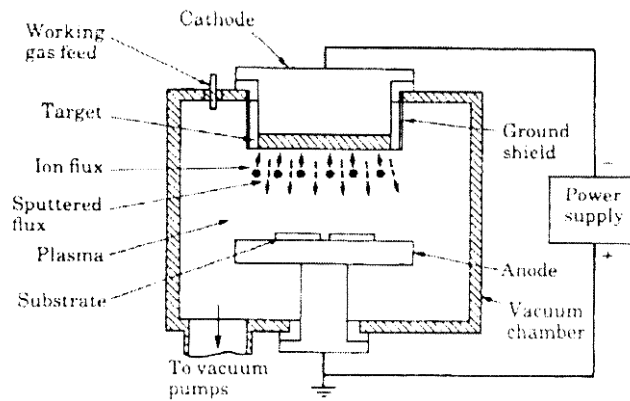
Σχ. 3.11 Πάχη επικαλύψεων παραγόμενων από διάφορες τεχνικές
 επιμετάλλωσης και εναπόθεσης.



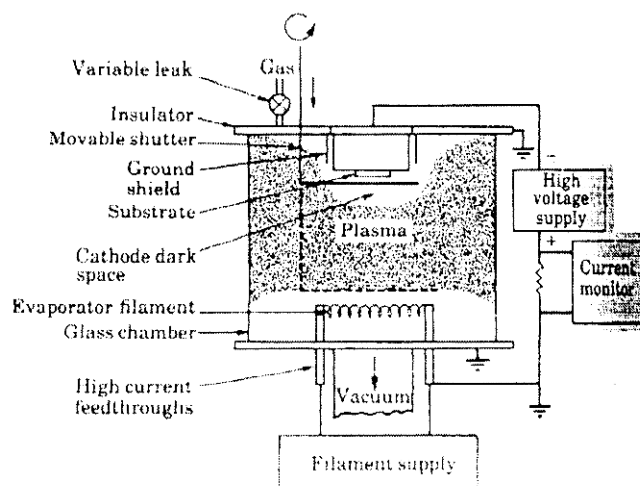
Σχ. 3.12 Θερμικός Ψεκασμός



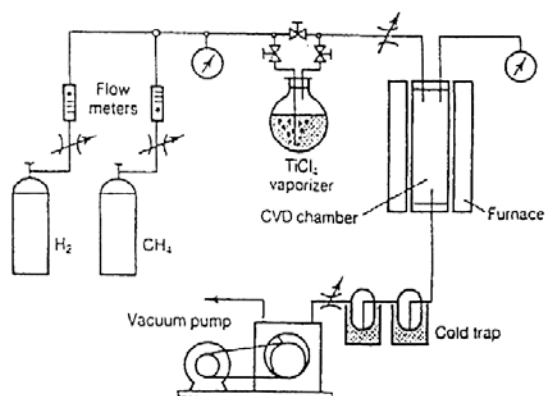
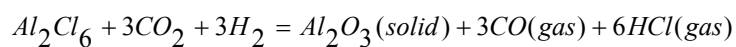
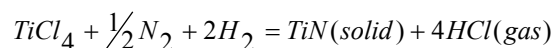
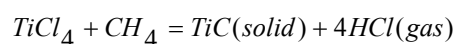
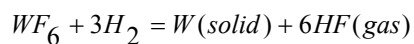
Σχ. 3.13 Φυσική Εναπόθεση Ατμών.



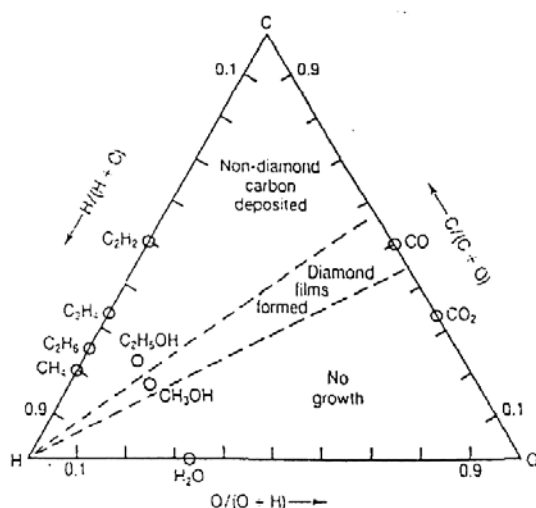
Σχ. 3.14 Sputtering – «Πιτσίλισμα».



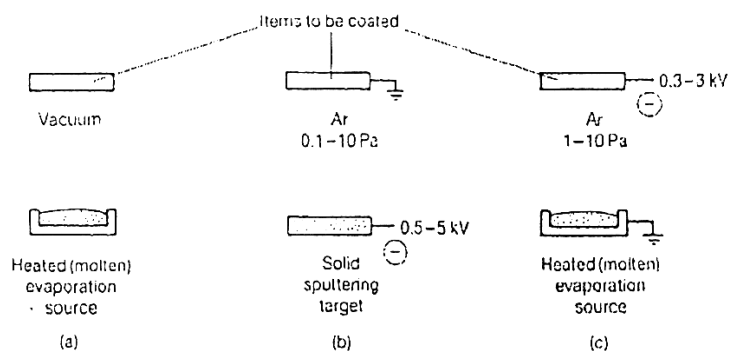
Σχ. 3.15 Ιοντοεναπόθεση.



Σχ. 3.16 Επικάλυψη Καρβιδίου του Τιτανίου με Χημική Εναπόθεση Ατμών.



Σχ. 3.17 Σχηματισμός μεμβρανών διαμαντιού ανάλογα με την ατομική σύσταση C, H, O, με Χημική εναπόθεση Ατμών.



Σχ. 3.18 Μέθοδοι Φυσικής Εναπόθεσης ατμών

α) Εξάτμιση, β) Sputtering, γ) ιοντοεναπόθεση.

Εφαρμογή κατεργασίας επιφανείας στους στροφαλοφόρους.

Οι στροφαλοφόροι στα αυτοκίνητα κατασκευάζονται από χάλυβες μέσου άνθρακα. Κατά την λειτουργία υπόκεινται σε κυκλική επαναλαμβανόμενη φόρτιση καθώς και σε σημαντική τριβή και φθορά. Εξηγήσατε γιατί χρησιμοποιούνται χάλυβες μέσου άνθρακα και υποδείξαμε μια διεργασία σκλήρωσης επιφανείας για αντοχή στην φθορά και την κόπωση.

Δεδομένου ότι το κόστος είναι ένας σημαντικός παράγων στην βιομηχανία του αυτοκινήτου το υλικό που θα επιλεγεί πρέπει να διαμορφώνεται εύκολα στο πολύπλοκο σχήμα του στροφαλοφόρου. Αυτοί οι χάλυβες όμως δεν διαθέτουν την απαραίτητο σκληρότητα για αντοχή στην φθορά.

Οι στροφαλοφόροι απαιτούν αυστηρό διαστατικό έλεγχο, οπότε θα απαιτηθούν πολλές κατεργασίες προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες διαστάσεις και ανοχές, και ο άξονας θα αποκτήσει ευθραυστότητα σ' αυτήν την εφαρμογή. Η φθηνότερη κατεργασία που δεν εισάγει διαστατικές αλλαγές είναι η σκλήρυνση περιβλήματος.

Υγρά ενανθρακωτικά μέσα: Συνίσταται ουσιαστικά από 20-50% κυανιούχο νάτριο με χλωριούχο νάτριο που θερμαίνονται στους 900-950° C σε κάποιο λουτρό. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την επίτευξη περιβλήματος 0,08-0,25 mm βάθους, κάτω από την επιφάνεια του στροφαλοφόρου.

Η προσθήκη βαρίου παράγει ενεργοποιημένα κυανιούχα λουτρά που χρησιμοποιούνται μέχρι βάθους 1mm. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ταχύτερη διείσδυση, υψηλότερο ποσοστό άνθρακα (1%) και χαμηλότερο ποσοστό αζώτου (0,24%) από τα συνήθη λουτρά. Αυτή η μέθοδος της σκλήρυνσης είναι ταχεία και καθαρή, επιτρέποντας το κομμάτι, στην περίπτωση μας, τον στροφαλοφόρο να υποστεί απόσβεση, αλλά τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τα εκλυόμενα αέρια είναι δηλητηριώδη.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο λουτρό των τηγμένων αλάτων παρουσία του σιδήρου αν και δεν είναι γνωστές, μπορούν γενικά να εκφρασθούν ως εξής:



Τόσο το μονοξείδιο του άνθρακα όσο και το άζωτο προκαλούν σκλήρυνση της επιφανείας του μετάλλου.

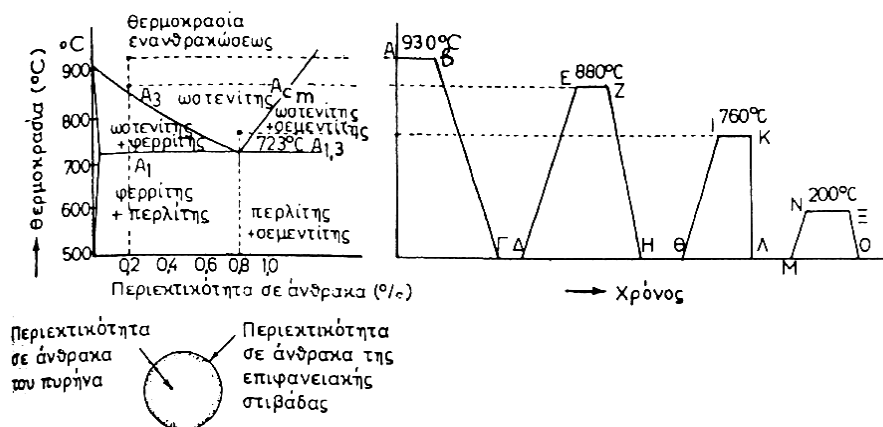
Ο αντικειμενικός σκοπός της ενανθράκωσης είναι ο στροφαλοφόρος να αποκτήσει μεγάλη σκληρότητα στην επιφάνεια και μεγάλη δυσθραυστότητα στον πυρήνα του. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά θερμικών κατεργασιών που εκτελούνται μετά την ενανθράκωση, ως εξής:

Μετά την ενανθράκωση (γραμμή A-B του Σχ. 3.19) τα τεμάχια αποψύχονται ήρεμα (B-Γ). Για την αύξηση της δυσθραυστότητας του πυρήνα (εκλέπτυνση των κόκκων), τα τεμάχια θερμαίνονται σε θερμοκρασία λίγο υψηλότερη από το ανώτερο σημείο A₃ του διαγράμματος θερμικής ισορροπίας

κατά την γραμμή Δ-Ε. Σ' αυτήν την θερμοκρασία παραμένουν τα τεμάχια για ορισμένο χρόνο (Ε-Ζ). Ακολουθεί βαφή η εξομάλυνση των τεμαχίων (Ζ-Η). Έτσι επιτυγχάνεται τελικά λεπτόκοκκος πυρήνας του στροφαλοφόρου.

Μετά από αυτή την θερμική κατεργασία, η επιφανειακή στοιβάδα των τεμαχίων εξακολουθεί να έχει χονδρόκοκκο ιστό, λόγω της θέρμανσής του σε θερμοκρασία λίγο υψηλότερη από το κρίσιμο σημείο A_3 . Αυτή η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή σε σχέση με το ανώτερο κρίσιμο σημείο (723°C) για την περιεκτικότητα σε άνθρακα και της επιφανειακής στοιβάδας ($>0,80\%$). Για να αποκτήσει η επιφανειακή στοιβάδα μεγάλη σκληρότητα και λεπτόκοκκο ιστό, πυρώνουμε τα τεμάχια σε 760°C περίπου (Θ-Ι). Σ' αυτήν την θερμοκρασία παραμένουν για ορισμένο χρόνο (Ι-Κ), όπου ο χονδρόκοκκος ιστός της επιφανειακής στοιβάδας μετασχηματίζεται σε λεπτόκοκκο ωστενίτη. Κατόπιν τα τεμάχια βάζονται και αποκτούν σκληρή και λεπτόκοκκη επιφανειακή στρώση. Η βαφή αυτή αποτελεί, κατά κάποιο τρόπο, επαναφορά του πυρήνα των τεμαχίων.

Τέλος για να απαλλαγεί η επιφανειακή στοιβάδα από εσωτερικές μηχανικές τάσεις, τα τεμάχια θερμαίνονται σε 200°C περίπου (Μ-Ν) και αποψύχονται ήρεμα (Ξ-Ο).



Σχ. 3.19 Θερμικές κατεργασίες χάλυβα μετά την ενανθράκωση.

4. ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα λιπαντικά χρησιμοποιούνται για την ομαλή λειτουργία των μηχανών και των μηχανισμών και αποσκοπούν στην ελάττωση της τριβής και της φθοράς των κινουμένων μεταλλικών μερών.

Με τη χρησιμοποίηση των λιπαντικών μετατρέπουμε την ξηρή τριβή, μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών, σε υγρή. Έτσι επιτυγχάνουμε την ελάττωση σε μεγάλο βαθμό, τόσο του συντελεστή τριβής όσο και της φθοράς.

Ο ρόλος του λιπαντικού στη σωστή λειτουργία και συντήρηση ενός μηχανήματος είναι πολύ σημαντικός. Η διάρκεια ζωής ενός μηχανήματος εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του σωστού λιπαντικού και την σωστή χρησιμοποίησή του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση νεός ακατάλληλου λιπαντικού, η κακή χρησιμοποίηση ενός κατάλληλου λιπαντικού, δεν δείχνει άμεσα τα καταστροφικά αποτελέσματα στη ζωή ενός μηχανήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται μετά από αρκετό χρόνο και όταν η βλάβη έχει προχωρήσει τόσο, ώστε να απαιτούνται πολύ σημαντικές επισκευές, ή έχει αχρηστεύσει το μηχανήμα.

Ενώ η αγορά ενός λιπαντικού, σαν δαπάνη, αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό των εξόδων συντήρησης (περίπου 5%), η μη σωστή λίπανση μπορεί να επιβαρύνει το κόστος των προϊόντων με ένα πολύ σημαντικό ποσοστό (σταματήματα παραγωγής, εργατικά για αποκατάσταση βλαβών, κόστος ανταλλακτικών κ.α.).

Πριν μερικά χρόνια, ο τομέας της λίπανσης ήταν παραμελημένος ή και άγνωστος, τόσο στους κατασκευαστές μηχανημάτων όσο και στους πελάτες τους. Σήμερα όμως έγινε κατανοητό από όλους, πόσο σημαντική είναι η σωστή λίπανση, με αποτέλεσμα να θεωρείται σαν το σημαντικότερο ενός οργανωμένου προγράμματος προληπτικής συντήρησης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνει πλέον ο κατασκευαστής, στη σωστή σύνθεση λιπαντικού και στις οδηγίες χρήσης του, για την σωστότερη και αποδοτικότερη λειτουργία του μηχανήματος.

Η τυποποίηση και ενοποίηση των λιπαντικών (λιπαντικά αυτοκινήτων, βιομηχανικά λιπαντικά, γράσσα κ.λπ.) έχει γίνει μετά τη δημιουργία οργανισμών όπως:

- SAE (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS)
- API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE)
- ASLE (AMERICAN SOCIETY OF LUBRICATION ENGINEERS)
- ISO (INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION)
- NIGI (NATIONAL LUBRICATING GREASE INSTITUTE) κ.α.

4.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ

Οι βασικές ιδιότητες που απαιτούμε από τα λιπαντικά είναι:

α. Λιπαντική ικανότητα.

Με τον όρο εννοούμε την ικανότητα του λιπαντικού να σχηματίζει λιπαντικό στρώμα μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών, που θα διατηρείται κατά τις συνθήκες λειτουργίας και θα είναι ικανό να φέρει τα φορτία που αναπτύσσονται.

Στη λιπαντική ικανότητα των λιπαντικών, οφείλεται η μετατροπή της ξηρής τριβής σε υγρή, με αποτέλεσμα την μείωση της τριβής και της φθοράς.

β. Ψυκτική ικανότητα.

Είναι η ικανότητα του λιπαντικού να παίρνει ποσά θερμότητας από τα σημεία τριβής των μεταλλικών επιφανειών και να παρεμποδίζει έτσι την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η ικανότητα αυτή έχει σχέση με την ειδική θερμότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του λιπαντικού.

γ. Σταθερότητα.

Είναι η ικανότητα του λιπαντικού να εμποδίζει αλλοιώσεις της ύλης του, κάτω από τις συνθήκες που δημιουργούνται με την λειτουργία του μηχανήματος. Ένα λιπαντικό μπορεί να είναι άριστο στην αρχή της χρησιμοποίησής του και με την πάροδο του χρόνου να παθαίνει τέτοιες αλλοιώσεις, που να κάνει την χρησιμοποίησή του καταστρεπτική για το μηχανήμα (π.χ. τα ζωϊκά ή φυτικά λάδια και λίπη). Σε λιπαντικά που έχουν σταθερότητα αποφεύγουμε καταστάσεις όπως η παραπάνω.

δ. Παθητικότητα ή αδράνεια.

Είναι η ιδιότητα του λιπαντικού να μην δημιουργεί διαβρωτικές ουσίες που θα μπορούσαν να προσβάλλουν τις μεταλλικές επιφάνειες. Όπως επίσης η ικανότητά του να παρέχει αντιδιαβρωτική προστασία στις επιφάνειες, από τις εξωτερικές συνθήκες.

Εκτός από τις τέσσερις παραπάνω ιδιότητες που απαιτούμε να έχει το λιπαντικό, υπάρχουν κι άλλες που επιθυμούμε να έχει, ανάλογα με τη χρήση του, όπως:

- Γαλακτωματοποιητικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης εργαλείων κοπής.

- Απογαλακτωματοποιητικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης ατμοστροβίλων.
- Καθαριστικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης μηχανών εσωτερικής καύσης.
- Μονωτικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης ηλεκτρικών μετασχηματιστών και διακοπών.
- Αντοχή στην οξείδωση: λόγω επαφής των λαδιών με τον αέρα, την παρουσία καταλυτών και την θερμοκρασία. Η οξείδωση εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας κάθε περίπτωσης. Τα αποτελέσματα αυτού του φαινομένου είναι:

α) Το λάδι γίνεται πιο παχύρευστο με επακόλουθο την αύξηση των εσωτερικών τριβών και της θερμοκρασίας λειτουργίας.

β) Δημιουργία λάσπης που επικάθεται στα τοιχώματα των κάρτερ, των κιβωτίων κ.λπ. παρεμποδίζοντας έτσι την απαγωγή της θερμότητας.

γ) Αύξηση των ανθρακούχων υπολειμμάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών και προκαλούν φθορές.

- Σημείο ροής και σημείο θόλωσης: είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία το λάδι εξακολουθεί να ρέει. Αποτελεί χρήσιμη πληροφορία της κατώτερης θερμοκρασίας, στην οποία μπορεί το λάδι να ρέει στα συστήματα λίπανσης με βαρύτητα αλλά δεν μας παρέχει πληροφορίες για την συμπεριφορά του λαδιού στα συστήματα λίπανσης με πίεση ή όταν το λάδι αναδεύεται, με αποτέλεσμα να καταστρέφεται το κρυσταλλικό πλέγμα της παραφίνης.
- Το σημείο θόλωσης είναι η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η κρυστάλλωση της παραφίνης, οπότε το λάδι γίνεται θολό. Το σημείο θόλωσης είναι συνήθως ανώτερο του σημείου ροής.
- Οξύτητα και αλκαλικότητα: Οξύτητα είναι ο αριθμός των χιλιοστογράμμων KOH, που απαιτούνται για την εξουδετέρωση ενός γραμμαρίου όξινου λαδιού. Δηλαδή ο αριθμός που δίνει μια ένδειξη για την κατάσταση του λαδιού, σε σχέση με τα οξέα που περιέχονται σε αυτό, που δημιουργούνται από τα προϊόντα της καύσης που σχηματίζονται στους κινητήρες ή από την οξείδωση του λαδιού.

Αλκαλικότητα είναι η ποσότητα του οξέος σε χιλιοστόγραμμα KOH, που απαιτούνται για την εξουδετέρωση ενός γραμμαρίου αλκαλικού λαδιού, και δίνει ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας των πρόσθετων που περιέχονται σε ένα λάδι. Αν είναι χαμηλός, σημαίνει πως τα πρόσθετα έχουν καταναλωθεί για την αντιμετώπιση των προϊόντων της οξείδωσης, οπότε το λάδι δεν προστατεύει ικανοποιητικά τα μέταλλα της μηχανής.

- Αριθμός απογαλακτωματοποίησης: είναι απαραίτητος στα λάδια που χρησιμοποιούνται για την λίπανση των ατμομηχανών, ατμοστροβίλων, των εδράνων στα έλαστρα των χαλυβουργιών και γενικά σε όλες τις περιπτώσεις όπου το λάδι μπορεί να έλθει σε επαφή με το νερό. Η

παρουσία του νερού στο λάδι δημιουργεί γαλάκτωμα που είναι διαβρωτικό για τις επιφάνειες που λιπαίνει.

- Σημείο ανάφλεξης, καύσης και αυτανάφλεξης: το σημείο ανάφλεξης είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία ένα λάδι θερμαινόμενο παράγει ατμούς, που μπορούν στιγμιαία να αναφλεγούν στο πλησίασμα μιας φλόγας. Αν θερμάνουμε το λάδι σε υψηλότερη θερμοκρασία έτσι ώστε να μην γίνει μόνο στιγμιαία ανάφλεξη αλλά να έχουμε παραγωγή ατμών και διατήρηση της καύσης για 5 τουλάχιστον sec, η θερμοκρασία αυτή είναι το σημείο καύσης. Η κατώτερη θερμοκρασία που ένα λάδι αναφλέγεται, παρουσία αέρα ή οξυγόνου, χωρίς να πλησιάσει φλόγα, ονομάζεται σημείο αυτανάφλεξης και είναι πολύ ανώτερο του σημείου ανάφλεξης.
- Αντισκωριακή προστασία: η σκωρίαση των σιδηρών επιφανειών είναι μια χημική δράση που προχωρεί πολύ γρήγορα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (αέρας, υγρασία) και μπορεί να τεθεί υπό έλεγχο με μεγάλη δυσκολία όταν αρχίσει. Οι αντισκωριακές ιδιότητες των λαδιών δεν είναι αρκετές για την αποτελεσματική προστασία των σιδηρών επιφανειών που είναι εκτεθειμένες στο περιβάλλον ή αποτελούν τα εσωτερικά τοιχώματα των μηχανών. Είναι λοιπόν απαραίτητη η καλή πρόσφυση των λαδιών πάνω στις προς προστασία επιφάνειες.

4.3. ΕΙΔΗ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ

Ανάλογα με την φυσική τους κατάσταση κατά την χρησιμοποίησή τους, χωρίζονται τα λιπαντικά σε:

- αέρια λιπαντικά
- υγρά λιπαντικά
- στερεά λιπαντικά.

4.4. ΑΕΡΙΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Στην πράξη χρησιμοποιείται μόνο ο αέρας.

Πλεονεκτήματα του αέρα σαν λιπαντικό είναι:

- Η μεγάλη σταθερότητά του
- Η μεγάλη παθητικότητά του
- Ο μικρός συντελεστής τριβής.

Μειονεκτήματα είναι:

- Μικρή ικανότητα λίπανσης κάτω από φορτίο
- Μικρή ψυκτική ικανότητα

Λίπανση με αέρα έχουμε σε περιπτώσεις όπου έχουμε υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα τα κοινά λιπαντικά να διασπώνται ή να απανθρακώνονται. Όπως επίσης σε περιπτώσεις που δεν θέλουμε να έλθει σε επαφή το λιπαντικό με την κατεργαζόμενη ύλη κ.α.

4.5. ΥΓΡΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Στα υγρά λιπαντικά υπάγονται:

- Το νερό
- Τα ζωϊκά και φυτικά λίπη και λάδια
- Τα ορυκτέλαια
- Τα συνθετικά λιπαντικά

4.5.1. ΝΕΡΟ – ΖΩΙΚΑ ΚΑΙ ΦΥΤΙΚΑ ΛΙΠΗ ΚΑΙ ΛΑΔΙΑ

Το νερό παρουσιάζει μεγάλη ψυκτική ικανότητα και μεγάλη σταθερότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχει όμως πολύ μικρή λιπαντική ικανότητα και μεγάλη διαβρωτική ενέργεια στις μεταλλικές επιφάνειες.

Τα ζωϊκά και φυτικά λίπη και λάδια έχουν πολύ καλή λιπαντική ικανότητα, δεν έχουν όμως παθητικότητα και σταθερότητα. Κατά τη χρήση τους οξειδώνονται εύκολα και μετατρέπονται σε παχύρευστες ουσίες με μεγάλη οξύτητα, που είναι βλαβερές για τις μεταλλικές επιφάνειες.

4.5.2. ΟΡΥΚΤΕΛΑΙΑ

Ορυκτέλαιο ονομάζουμε το υγρό που είναι μείγμα υδρογονανθράκων (προϊόντα διύλισης πετρελαίου) και διαφόρων άλλων χημικών ουσιών. Τα ορυκτέλαια συνδυάζουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό όλες τις βασικές ιδιότητες των λιπαντικών και είναι αρκετά οικονομικά. Γι' αυτό είναι το πιο διαδεδομένο λιπαντικό μέσο.

Μετά τον Β' παγκόσμιο πόλεμο οι διάφορες τεχνικές διύλισης για παραγωγή ορυκτέλαιων είχαν βελτιωθεί τόσο, που δεν υπήρχαν πολλά περιθώρια για καλύτερη ποιότητα λαδιών από τα διυλιστήρια. Από την άλλη πλευρά η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας δημιούργησε αυξημένες απαιτήσεις από τα λιπαντικά (υψηλές ταχύτητες, μεγάλα φορτία κ.λπ.). Έτσι άρχισαν να παράγονται μίγματα των προϊόντων της διύλισης με διάφορες χημικές ουσίες. Τις ουσίες αυτές τις ονομάζουμε πρόσθετα ή βελτιωτικά ορυκτελαίων.

Η χρησιμοποίηση των προσθέτων στα ορυκτέλαια που παράγουμε από τα διυλιστήρια, έχει σαν αποτέλεσμα:

- Την βελτίωση μιας ή και περισσότερων ιδιοτήτων του λιπαντικού.
- Την μείωση του ρυθμού που το λιπαντικό υφίσταται ανεπιθύμητες ποιοτικές μεταβολές κατά την διάρκεια της χρησιμοποίησής του.
- Δίνει στο λιπαντικό τελείως νέες ιδιότητες που βελτιώνουν την απόδοσή του.

Μερικά από τα πρόσθετα μπορούν και επιδρούν σε παραπάνω από μια ιδιότητες του λιπαντικού, ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρειάζονται να προστεθούν πρόσθετα για να πετύχουμε την επιθυμούμενη ποιότητα.

Ένα πρόσθετο δεν συμπεριφέρεται πάντα με τον ίδιο τρόπο, ο τρόπος δράσης του εξαρτάται, από το βασικό λάδι και τα άλλα πρόσθετα που υπάρχουν σε αυτό. Σε μερικές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι πρόσθετα έδρασαν διαφορετικά από ότι αναμενόταν ή αντέδρασαν χημικά με άλλα πρόσθετα, με αποτέλεσμα την καταστροφή του λιπαντικού. Γι' αυτό πρέπει να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση προσθέτων πέρα από αυτά που περιέχονται στο λιπαντικό.

Για την παραγωγή ενός ορυκτελαίου με μια εμπορική ονομασία απαιτείται πολύς χρόνος και πολλές δοκιμές και βελτιώσεις μέχρι να βγάλουμε το τελικό προϊόν. Επίσης πρέπει να τονισθεί ότι ακόμη και αν η εμπορική ονομασία παραμένει η ίδια, η ποιότητα του λιπαντικού βελτιώνεται συνέχεια, με σκοπό να ανταποκρίνεται κάθε φορά στις νέες προδιαγραφές.

Πρόσθετα χρησιμοποιούμε κυρίως, στα ορυκτέλαια που χρησιμοποιούνται στις μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK) και στα συστήματα μετάδοσης κίνησης των αυτοκινήτων και της βιομηχανίας. Σε μικρότερο βαθμό, αλλά σε συνεχώς αυξανόμενη κλίμακα χρησιμοποιούνται πρόσθετα στα ορυκτέλαια των υδραυλικών και κυκλοφοριακών συστημάτων, των αεροσυμπιεστών και των διαφόρων συστημάτων των αεροσκαφών.

Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για τα ορυκτέλαια είναι αρκετές εκατοντάδες χημικές ενώσεις ή μείγματά του. Μπορούμε όμως να τα χωρίσουμε σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Πρόσθετα που επιδρούν στις φυσικές ιδιότητες των λιπαντικών. Τα αποτελέσματα της προσθήκης του μπορούν να προσδιοριστούν με απλές άμεσες μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων.
- Πρόσθετα που βελτιώνουν τις καθαρά χημικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του λιπαντικού. Τα αποτελέσματα της προσθήκης τους μπορούν να προσδιορισθούν, μόνο από την συμπεριφορά του λιπαντικού σε πραγματικές ή εξομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας.

Παραδείγματα πρόσθετων:

Αντιοξειδωτικά: εμποδίζουν την οξείδωση του λαδιού και τη δημιουργία δαλυτών οξειδίων και αδιάλυτων προϊόντων (λάσπης, εξανθρακώματα, κολλώδεις ουσίες).

Απορρυπαντικά και διασκορπιστικά πρόσθετα: Η καύση του πετρελαίου ή της βενζίνης σε ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης παράγει νερό που είναι ένα από τα πιο επιβλαβή στοιχεία. Παράλληλα το θείο που υπάρχει (0,3-0,7%) στο πετρέλαιο ντήζελ, καίγεται προς διοξείδιο το οποίο αντιδρά με το νερό και δίδει θειϊκό οξύ. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί κρύος, τα προϊόντα της ατελούς καύσης του πετρελαίου ή της βενζίνης, τα διάφορα κατάλοιπα και το νερό, πηγαίνουν στο κάρτερ όπου αναμιγνύονται μεταξύ τους δημιουργώντας μια παχιά λάσπη. Αν η λάσπη κυκλοφορήσει μπορεί να φράξει την αντλία και το φίλτρο του λαδιού ή ακόμα μπορεί να καεί δίνοντας νέα κατάλοιπα. Με τα απορρυπαντικά πρόσθετα εμποδίζουμε ή περιορίζουμε τη δημιουργία των καταλοίπων και εξουδετερώνουμε τα διάφορα οξέα.

Με τα διασκορπιστικά πρόσθετα, κατορθώνουμε να διατηρήσουμε σε διασπορά τις ουσίες που έχουν την τάση να σχηματίζουν λάσπη μέσα στην μηχανή.

Πρόσθετα για την ταπείνωση του σημείου ροής: Διατηρούν την ρευστότητα του λαδιού σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Πρόσθετα για την βελτίωση του δείκτη ιξώδους.

Διατηρούν την ρευστότητα του λαδιού σταθερή στις υψηλές θερμοκρασίες. Με αυτά τα πρόσθετα κατασκευάστηκαν τα πολύτυπα λάδια των αυτοκινήτων. Στις χαμηλές θερμοκρασίες αυτά τα πρόσθετα περιτυλίσσονται καταλαμβάνοντας πολύ μικρό όγκο, διευκολύνοντας έτσι την ροή του λαδιού, ενώ με την άνοδο της θερμοκρασίας εκτυλίσσονται και προβάλλουν μεγάλη αντίσταση στην ροή με αποτέλεσμα να διατηρείται το ιξώδες υψηλό.

Πρόσθετα υψηλής πίεσης: Κυρίως θειούχες, φωσφορούχες ή μολυβδούχες ενώσεις. Όταν ανέβει η θερμοκρασία μεταξύ τριβομένων επιφανειών υπό μεγάλο φορτίο, το πρόσθετο υψηλής πίεσης αντιδρά με το μέταλλο και σχηματίζει ένα προστατευτικό στρώμα οπότε η τριβή δεν γίνεται μεταξύ των μετάλλων αλλά πάνω στα δύο προστατευτικά στρώματα, που εμφανίζουν πολύ μικρότερη αντίσταση στην τριβή.

4.5.3. ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Τα συνθετικά λιπαντικά είναι ιδιαίτερες χημικές ενώσεις όπως εστέρες, πολυμερή κ.λπ. που παρασκευάζονται συνθετικά.

Τα συνθετικά λιπαντικά είναι υγρά, αλλά μπορούν να στερεοποιηθούν με την προσθήκη στερεοποιητικών ουσιών.

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις λίπανσης όπου η χρησιμοποίηση ορυκτελαίων δεν θεωρείται ικανοποιητική (π.χ. λίπανση αεριοθουμένων αεροπλάνων).

Τα συνθετικά λιπαντικά όπως αναφέρθηκε είναι χημικά προϊόντα που παρασκευάζονται με την μέθοδο της χημικής σύνθεσης λ.χ. πολυμερισμός ή πρόσμιξη ενός προϊόντος σε ένα άλλο. (Πρόσμιξη οξέως σε αλκοόλη για την δημιουργία εστέρα). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτυγχάνεται:

1. Ανεξαρτοποίηση σε ότι έχει σχέση με τις πηγές προμήθειας πρώτων υλών.
2. Εξασφαλισμένη συνεχή ποιότητα μέσω της τέλει αναπαραγωγής της χημικής σύνθεσης.

Τα πλεονεκτήματα των συνθετικών λιπαντικών σε σχέση με τα ορυκτά λιπαντικά είναι τα εξής:

α) Χαμηλότερο σημείο ροής, που επιτρέπει την χρήση του λιπαντικού σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

β) Μεγαλύτερη αντίσταση στην οξειδωση, με αποτέλεσμα να έχουν ικανοποιητική λειτουργία στις υψηλές θερμοκρασίες και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο αλλαγών.

γ) Υψηλό δείκτη ιξώδους που επιτρέπει την χρήση τους σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές.

δ) Χαμηλότερο σημείο εξάτμισης, που σημαίνει μικρότερη κατανάλωση λιπαντικού.

ε) Καλύτερη λιπαντικότητα, με αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερες φθορές, μεγαλύτερη ζωή της μηχανής και χαμηλότερο κόστος επισκευών.

στ) Υψηλότερο σημείο ανάφλεξης, άρα μεγαλύτερη ασφάλεια.

ζ) Δεν δημιουργούν κατάλοιπα

η) Χημική αδράνεια και έλλειψη τοξικότητας, οπότε απλουστεύεται το σοβαρό πρόβλημα των αποβλήτων.

4.6. ΣΤΕΡΕΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Τα στερεά λιπαντικά δεν λυώνουν κατά την χρησιμοποίησή τους, αλλά ενεργούν σαν στερεό στρώμα που παρεμβάλλεται μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών. Η λιπαντική ικανότητά τους οφείλεται στη δομή τους που αποτελείται από στρωματικά πλέγματα. Έτσι τα στρώματα αποσχίζονται μεταξύ τους και μπορούν να ολισθαίνουν με μικρό συντελεστή τριβής.

Τα πιο γνωστά στερεά λιπαντικά είναι:

- ο γραφίτης
- το διθειούχο μολυβδένιο (MoS_2)

Ο γραφίτης και το διθειούχο μολυβδένιο χρησιμοποιούνται με την μορφή πάρα πολύ λεπτών αιωρημάτων, σε ορυκτέλαια ή συνθετικά λιπαντικά. Ο γραφίτης έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και σε υδατικά διαλύματα.

4.7. ΓΡΑΣΣΑ

Γράσσο ονομάζουμε ένα στερεό ή παχύρευστο προϊόν διασποράς ενός παχυντή μέσα σε ένα υγρό λιπαντικό. Στο προϊόν αυτό μπορεί να περιέχονται και άλλα συστατικά που τους δίνουν πρόσθετες ιδιότητες. Σαν υγρά λιπαντικά για την παραγωγή γράσσων χρησιμοποιούνται ορυκτέλαια και συνθετικά λάδια. Κατά τη χρησιμοποίησή τους τα γράσσα συμπεριφέρονται σαν υγρά, γι' αυτό υπάγονται στα υγρά λιπαντικά.

Τα γράσσα χρησιμοποιούνται συνήθως αντί των λαδιών στις περιπτώσεις που το λιπαντικό πρέπει να διατηρεί την αρχική του θέση στον μηχανισμό, ιδιαίτερα όπου η δυνατότητα συμπλήρωσης ή αντικατάστασης είναι περιορισμένη. Τέτοιες συνθήκες λίπανσης μπορεί να οφείλονται στο σχεδιασμό του μηχανισμού, στο τρόπο κίνησης, στην ανάγκη να λειτουργεί το λιπαντικό και σαν στεγανοποιητικό, παρεμποδίζοντας τις διαρροές ή την είσοδο επιβλαβών ουσιών.

Τα γράσσα επειδή έχουν στερεά δομή δεν κάνουν ψύξη και καθαρισμό των συστημάτων, όπως τα λάδια. Εκτός όμως από αυτό τα μειονεκτήματά τους εμφανίζουν συμπεριφορά αντίστοιχη με τα λάδια. Έτσι το γράσσο πρέπει:

- Να λιπαίνει τις επιφάνειες.
- Να στεγανοποιεί το σύστημα.
- Να προστατεύει τις επιφάνειες από την επίδραση του περιβάλλοντος.
- Να έχει αντοχή στα θερμικά φαινόμενα και στις καταπονήσεις.
- Να διατηρεί τις ιδιότητές του για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- Να μην οξειδώνεται.
- Να εμφανίζει αντοχή στην υδρόλυση.
- Να είναι συμβατό με τα υλικά κατασκευής του μηχανισμού.
- Να μην αυξάνεται υπερβολικά η συνεκτικότητά του στις χαμηλές θερμοκρασίες.
- Να είναι δυνατή η μεταφορά του με πίεση σε μεγάλες αποστάσεις, χωρίς να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του.
- Να έχει τα κατάλληλα φυσικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την εφαρμογή του κ.α.

Ταξινόμηση των γράσσων έγινε από το NLGI ανάλογα με την συνεκτικότητα των γράσσων. Έτσι προέκυψαν οι κατηγορίες γράσσων του πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1
Κατάταξη γράσσων κατά NLGI

Αριθμός NLGI	Κατεργασμένη διεισδυτικότητα
	Κατά ASTM*
000	445-475
00	400-430
0	355-385
1	310-340
2	265-295
3	220-250
4	175-205
5	130-160
6	85-115

* Οι τιμές είναι η διείσδυση σε δέκατα του χιλιοστού επί 5 sec σε 77° F (25° C)

Ιδιότητες

Υφή: Εξαρτάται από το μέγεθος των ινών του σάπωνα που έχει διασπαρεί στο λάδι. Όταν οι ίνες είναι μακριές η υφή του λίπους είναι ινώδης (Na) ενώ όταν είναι κοντές το λίπος είναι βουτυρώδες (Li, Ca).

Σταθερότητα της σύστασης: είναι η ικανότητα του σάπωνα να συγκρατεί το λάδι, ώστε να μην παρατηρείται διαχωρισμός του λαδιού κατά την αποθήκευση του λίπους.

Θερμική σταθερότητα σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις: Η θερμική σταθερότητα ενός λιπαντικού λίπους, καθορίζεται από την ικανότητα που έχει να ανακτήσει την αρχική του υφή, ύστερα από την συμπλήρωση ενός κύκλου θερμικής καταπόνησης. Η τελευταία εξασκείται υπό στατικές αλλά και δυναμικές συνθήκες. Η θερμική σταθερότητα εξαρτάται από τους θερμικούς μετασχηματισμούς της κρυσταλλικής δομής των σαπώνων.

Ρεολογικές ιδιότητες: Ιξώδες: παρά το γεγονός ότι η διεισδυτικότητα ενός γράσσου μας δίνει πληροφορίες σχετικά με την ευκολία ροής του λίπους από τον γρασσαδόρο στο έδρανο, δεν παρέχει σημαντικές ενδείξεις σχετικά με την δύναμη που απαιτείται για την τροφοδότηση των σημείων λίπανσης με αντλία.

Σημείο διαρροής:

Καθορίζει την ελάχιστη δύναμη που απαιτείται για να αρχίσει η ροή του γράσσου. Όταν το σημείο διαρροής είναι πολύ υψηλό, τα λίπη είναι δύσχυρηστα και απαιτούν μηχανικούς λιπαντήρες υψηλής πίεσης.

Σημείο στάξεως:

Η μέγιστη θερμοκρασία μέχρι την οποία μπορεί να εργασθεί ένα έδρανο που λιπαίνεται με λίπος.

Αντοχή στο νερό:

Τα γράσσα ασβεστίου είναι αδιάλυτα στο νερό, αλλά έχουν χαμηλό σημείο στάξεως. Αντίθετα τα λίπη με σάπωνα νατρίου διαλύονται στο νερό σχηματίζοντας γαλάκτωμα αλλά έχουν υψηλό σημείο στάξεως. Τα γράσσα με σάπωνα λιθίου χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή στο νερό και υψηλό σημείο στάξεως. Δεδομένου μάλιστα ότι έχουν και καλή αντοχή στην οξείδωση τα λίπη αυτά χρησιμοποιούνται πάρα πολύ.

Συνεκτικότητα: είναι η ικανότητα αντίστασης σε παραμόρφωση που εμφανίζει ένα πλαστικό σώμα, όταν εφαρμοσθεί σε αυτό μία δύναμη, στην περίπτωση των γράσσων, είναι ένα μέτρο της υφής τους, πολύ μαλακό, μαλακό, σκληρό, πολύ σκληρό και είναι ενδεικτική της ρεολογικής τους συμπεριφοράς (ανάλογα με το ιξώδες των λιπαντελαίων), και είναι ανάλογη με την διείδυση ενός κώνου ορισμένου βάρους και διαστάσεων, που αφήνεται να προσπέσει από συγκεκριμένο ύψος πάνω στην επιφάνεια του γράσσου που βρίσκεται σε ειδικό δοχείο.

Κατεργασμένη διείδυση: Τα γράσσα επιβάλλεται να διατηρούν για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα την συνεκτικότητα και την υφή τους κάτω από συνθήκες συνεχούς φόρτισης.

Μέτρο του μεγέθους της είναι η διαφορά της διειδυτικότητας του γράσσου που υπέστη 60 περίπου «διελεύσεις» μέσα από διάτρητη πλάκα βεβιασμένα και του ιδίου γράσσου που υπέστη 5.000 και 100.000. Για γράσσα σταθερής υφής και συνεκτικότητας, η διαφορά πρέπει να είναι λιγότερη από 30 μονάδες (1 μον.=0,1 mm).

Εφαρμογές των γράσσων: χρησιμοποιούνται για την λίπανση εδράνων ολίσθησης που λειτουργούν σε χαμηλές στροφές 400 rpm. Επειδή το γράσσο έχει την τάση να διαφεύγει από τα άκρα του εδράνου θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην ποιότητά του και τα διαστήματα αναλίπανσης. Επίσης χρησιμοποιούνται για την λίπανση εδράνων κύλισης. Τα γράσσα αυτής της κατηγορίας είναι βάσεως λιθίου με συνεκτικότητα NLGI 2 (μαλακό $265-295 \times 10^{-1}$ mm). Στις περιπτώσεις εκτεταμένων γραμμών παραγωγής και μεγάλου αριθμού σημείων εφαρμογής, η λίπανση επιτυγχάνεται μέσω κεντρικών συστημάτων. Τα γράσσα αυτής της κατηγορίας είναι συνήθως βάσεως λιθίου με συνεκτικότητα NLGI 1 (πολύ μαλακό $310-340 \times 10^{-1}$ mm ρευστό, $445-475 \times 10^{-1}$ mm πολύ ρευστό).

Τα κυριώτερα πλεονεκτήματα των γράσσων σε σχέση με τα λάδια είναι:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου ο σχεδιασμός του συστήματος είναι τέτοιος που θα υπάρχει ανεπιθύμητη διαρροή λιπαντικού (κίνδυνος μόλυνσης προϊόντων ή ανάφλεξης).
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την λίπανση ρουλεμάν που βρίσκονται σε μέρη με δύσκολη πρόσβαση ή λειτουργούν μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς συντήρηση.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου έχουμε μικρή ταχύτητα κίνησης, με αποτέλεσμα να μην έχουμε δημιουργία σφήνας λαδιού.
- Στεγανοποιούν το σύστημα και παρεμποδίζουν την είσοδο σκόνης ή άλλων επιβλαβών ουσιών στο εσωτερικό.
- Το σύστημα και οι συσκευές γρασσαρίσματος είναι απλούστερες και φθηνότερες από τις αντίστοιχες για λάδια.

Τα σοβαρότερα μειονεκτήματα είναι:

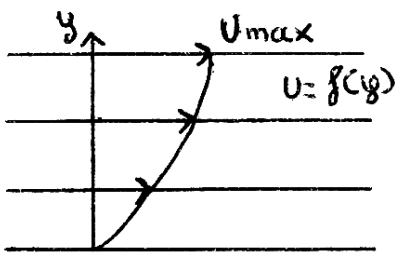
- Δεν μπορούν να ψύξουν το σύστημα.
- Δεν μπορούν να καθαρίσουν το σύστημα από επιβλαβή ξένα σώματα.
- Η δομή τους αλλάζει με τον χρόνο. Σε μερικά γράσσα αποχωρίζεται το λάδι και σκληραίνουν και άλλα γίνονται μαλακότερα με την επίδραση δονήσεων, υγρασίας κ.λπ.

5. ΙΞΩΔΕΣ

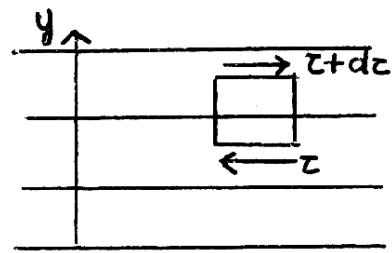
5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ονομάζουμε ιξώδες την αντίσταση που παρουσιάζει ένα υγρό στη ροή. Το ιξώδες ενός υγρού είναι το κριτήριο που διακρίνουμε αν το υγρό είναι λεπτόρευστο ή παχύρευστο.

Κατά την στρωτή ροή ενός υγρού η ταχύτητα δεν είναι ίδια σε όλα τα σημεία της μάζας του. Ξεκινά από μια μηδενική τιμή στην επιφάνεια επαφής, μέχρι μια τιμή U_{max} (Σχ. 5.1α).



Σχ. 5.1α



Σχ. 5.1β

Σε ένα στοιχειώδες όγκο υγρού θα έχουμε κατά τον άξονα των y αλλαγή της τιμής της τάσης απόσχισης (διάτμησης) από τ σε $\tau + d\tau$. Σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα έχουμε:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (5.1.1.)$$

Στην εξίσωση (5.1.1.) ο λόγος $\frac{du}{dy}$ ονομάζεται ταχύτητα απόσχισης (διάτμησης). Τα υγρά όπου η ταχύτητα απόσχισης είναι ανάλογη της τάσης απόσχισης τα ονομάζουμε νευτώνεια υγρά. Τον συντελεστή της αναλογίας της τάσης απόσχισης προς την ταχύτητα απόσχισης τον ονομάζουμε δυναμικό ιξώδες. Το δυναμικό ιξώδες είναι μέγεθος που χαρακτηρίζει την εσωτερική τριβή των υγρών, είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα ροής και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση.

Κινηματικό ιξώδες είναι το μέγεθος που δίνεται από τον τύπο:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (5.1.2.)$$

όπου:

η : το δυναμικό ιξώδες σε θερμοκρασία t

ρ : η πυκνότητα του υγρού σε θερμοκρασία t

5.2. ΜΟΝΑΔΕΣ ΙΞΩΔΟΥΣ

Μονάδα δυναμικού ιξώδους είναι το POISE (P)

$$1P = 10^{-1} Pa \cdot s$$

Μονάδα κινηματικού ιξώδους είναι το STROKE (ST)

$$1ST = 10^{-4} m^2 / s$$

Επειδή οι μονάδες POISE και STROKE είναι μεγάλες, στην πράξη χρησιμοποιούμε το CENTIPOISE (CP) και CENTISTROKE (CST)

$$1CP = 10^{-2} P$$

$$1CST = 10^{-2} ST$$

Η μέτρηση του κινηματικού ιξώδους γίνεται με την μέτρηση του χρόνου εκροής ορισμένης ποσότητας υγρού μέσα από τριχοειδή σωλήνα. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε για την μέτρηση του ιξώδους τα ονομάζουμε ιξωδόμετρα.

Στη βιομηχανία πετρελαίου χρησιμοποιούν εμπειρικά ιξωδόμετρα για την μέτρηση του ιξώδους των λαδιών.

Στην Αγγλία χρησιμοποιούνται τα ιξωδόμετρα REDWOOD I και REDWOOD II. Ιξώδες RED. I είναι ο χρόνος εκροής σε sec 50 cm³ λαδιού από το ιξωδόμετρο REDWOOD I στην θερμοκρασία της δοκιμής. Το ιξωδόμετρο REDWOOD II χρησιμοποιείται για παχύρευστα λάδια, έχει τρύπα εκροής μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα ο χρόνος εκροής να μειώνεται στο 1/10 του RED I.

Στην Αμερική χρησιμοποιείται το ιξωδόμετρο SAYBOLT, με αυτό μετρούμε το χρόνο εκροής 60 cm³ λαδιού στη θερμοκρασία της δοκιμής. Το ιξώδες που μετρούμε με το ιξωδόμετρο SAYBOLT το ονομάζουμε SAYBOLT UNIVERSAL. Για παχύρευστα λάδια χρησιμοποιείται το SAYBOLT FUROL που έχει χρόνο εκροής 1/10 του SAYBOLT UNIVERSAL.

Στη Γερμανία και άλλες ευρωπαϊκές χώρες χρησιμοποιείται το ιξωδόμετρο ENGLER. Το ιξώδες σε βαθμούς ENGLER, είναι η σχέση του χρόνου εκροής 200 cm³ στη θερμοκρασία της δοκιμής, προς το χρόνο εκροής 200 cm³ νερού αποσταγμένου στη θερμοκρασία των 20° C.

Για την μετατροπή του ιξώδους, από τη μια κλίμακα σε άλλη, υπάρχουν τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χονδρικούς υπολογισμούς. Όταν όμως απαιτείται ακρίβεια πρέπει να γίνεται κατ'ευθείαν ο απαιτούμενος προσδιορισμός.

Από τον τύπο:

$$V = A \cdot t - \frac{B}{t} \quad (5.2.1.)$$

μπορούμε να προσδιορίσουμε το κινηματικό ιξώδες V (CST) από το χρόνο εκροής t των ιξωδομέτρων REDWOOD και SAYBOLT, για την ίδια θερμοκρασία.

Το A και B είναι σταθερές.

Για SAYBOLT UNIVERSAL

$A=0,22$ $B=180$

Για REDWOOD I

$A=0,26$ $B=171$

Ο τρόπος προσδιορισμού των εμπειρικών ιξωδών και του κινηματικού, έχει σαν αποτέλεσμα να μην έχουμε την ίδια αντιστοιχία κινηματικού ιξώδους και εμπειρικών ιξωδών για όλες τις θερμοκρασίες. Γι' αυτό υπάρχουν ειδικοί συντελεστές που δίνονται από την ASTM, που χρησιμοποιούνται για ακριβέστερους προσδιορισμούς.

Για μετατροπή ιξωδους από μια κλίμακα σε άλλη για την ίδια θερμοκρασία υπάρχει ο πίνακας 5.1.

Πίνακας 5.1

V	E	R.I	S.U.	V	E	R.I	S.U.	V	E	R.I	S.U.
1.0	1.00	28.5	-	13.0	2.12	61	69.6	29	3.95	121	136.5
1.5	1.06	30	-	13.5	2.17	63	71.5	30	4.1	125	140.9
2.0	1.12	31	32.6	14.0	2.22	64.5	73.4	31	4.2	129	145.3
2.5	1.17	32	34.4	14.5	2.27	66	75.3	32	4.35	133	149.7
3.0	1.22	33	36.0	15.0	2.32	68	77.2	33	4.45	136	154.2
3.5	1.26	34.5	37.6	15.5	2.38	70	79.2	34	4.6	140	158.7
4.0	1.30	35.5	39.1	16.0	2.43	71.5	81.1	35	4.7	144	163.2
4.5	1.35	37	40.7	16.5	2.5	73	83.1	36	4.85	148	167.7
5.0	1.40	38	42.3	17.0	2.55	75	85.1	37	4.95	152	172.2
5.5	1.44	39.5	43.9	17.5	2.6	77	87.1	38	5.1	156	176.7
6.0	1.48	41	45.5	18.0	2.65	78.5	89.2	39	5.2	160	181.2
6.5	1.52	42	47.1	18.5	2.7	80	91.2	40	5.35	164	185.7
7.0	1.56	43.5	48.7	19.0	2.75	82	93.3	41	5.45	168	190.2
7.5	1.60	45	50.3	19.5	2.8	84	95.4	42	5.6	172	194.7
8.0	1.65	46	52.0	20.0	2.90	86	97.5	43	5.75	177	199.2
8.5	1.70	47.5	53.7	20.5	2.95	88	99.6	44	5.85	181	203.8
9.0	1.75	49	55.4	21.0	3.0	90	101.7	45	6.0	186	208.4
9.5	1.79	50.5	57.1	21.5	3.05	92	103.9	46	6.1	189	213.0
10.0	1.83	52	58.8	22.0	3.1	93	106.0	47	6.25	193	217.6
10.2	1.85	52.5	59.5	22.5	3.15	95	108.2	48	6.45	197	222.2
10.4	1.87	53	60.2	23.0	3.2	97	110.3	49	6.5	201	226.8
10.6	1.89	53.5	60.9	23.5	3.3	99	112.4	50	6.65	205	231.4
10.8	1.91	54.5	61.6	24.0	3.35	101	114.6	52	6.9	213	240.6
11.0	1.93	55	62.3	24.5	3.4	103	116.8	54	7.1	221	249.9
11.4	1.97	56	63.7	25	3.45	105	118.9	56	7.4	229	259.0
11.8	2.00	57.5	65.2	26	3.6	109	123.3	58	7.65	237	268.2
12.2	2.04	59	66.6	27	3.7	113	127.7	60	7.9	245	277.4
12.6	2.08	60	68.1	28	3.85	117	132.1	70	-	-	323.4

Για τιμές ιξώδους μεγαλύτερες από αυτές του πίνακα 5.1, χρησιμοποιούμε τους εμπειρικούς τύπους:

$$\begin{array}{lll} E = 0,132 V & RI = 4,05 V & SU = 4,62 V \\ V = 7,58 E & RI = 30,7 E & SU = 35,11 E \\ V = 0,247 RI & E = 0,0326 RI & SU = 1,14 RI \\ V = 0,216 SU & E = 0,0285 SU & RI = 0,877 SU \end{array}$$

Όπου:

V : κινηματικό ιξώδες σε CST

E : βαθμοί ENGLER

RI : δευτερόλεπτα REDWOOD I

SU : δευτερόλεπτα SAYBOLT UNIVERSAL

5.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΙΞΩΔΕΣ

Το ιξώδες ενός νευτώνειου υγρού είναι σταθερό για την αυτή θερμοκρασία, και χαρακτηρίζει το υγρό. Μεταβάλλοντας την θερμοκρασία, μεταβάλλεται και το ιξώδες. Το ιξώδες αυξάνεται όταν ελαττώνεται η θερμοκρασία και μειώνεται όταν αυξάνει η θερμοκρασία. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι δεν έχει έννοια να αναφέρουμε το ιξώδες κάποιου λαδιού, χωρίς ταυτόχρονα να αναφέρουμε και τη θερμοκρασία που προσδιορίστηκε το ιξώδες.

Το ιξώδες ενός λαδιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο του WALTHER.

$$\log \cdot \log (V + 0,7) = A \cdot \log T + B \quad (5.3.1.)$$

όπου:

log : δεκαδικός λογάριθμος

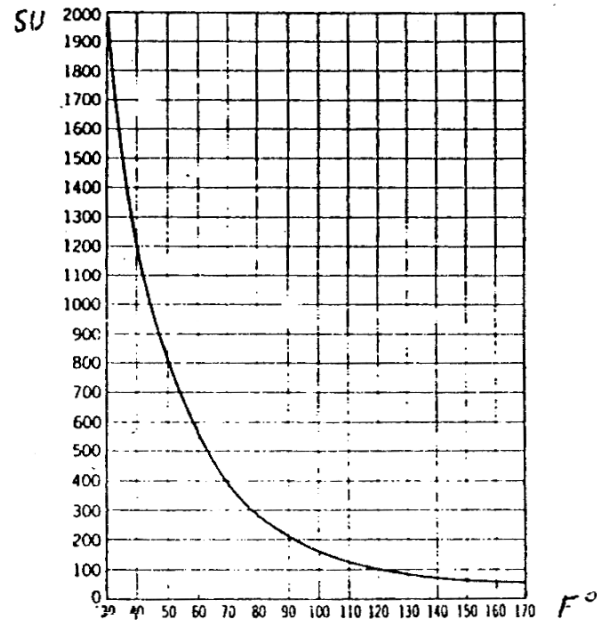
V : κινηματικό ιξώδες σε CST

T : απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς RANKIN

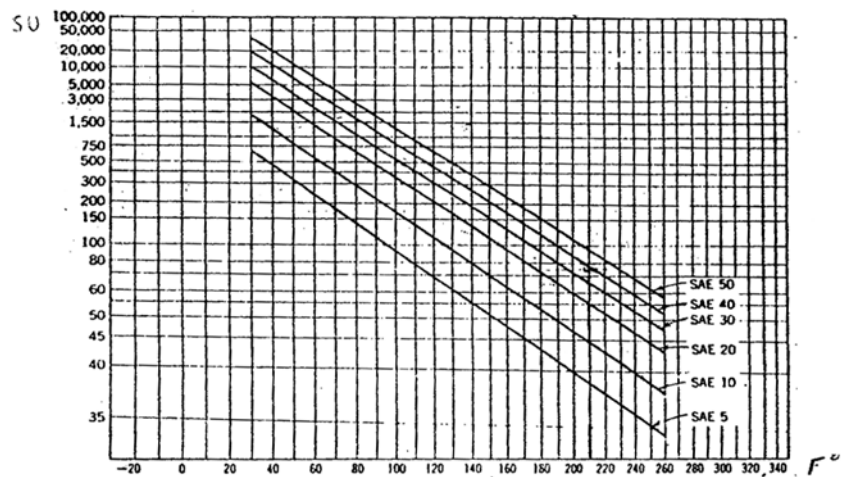
A, B : σταθερές χαρακτηριστικές του λαδιού.

Για να υπολογίσουμε τις σταθερές A και B ενός λαδιού χρειάζεται να προσδιορίσουμε το κινηματικό ιξώδες για δύο θερμοκρασίες T_1 και T_2 . Αντικαθιστώντας τις τιμές του κινηματικού ιξώδους και των θερμοκρασιών στον τύπο (5.3.1.), δημιουργούμε δύο εξισώσεις με δύο αγνώστους και υπολογίζουμε τις σταθερές A και B. Αφού υπολογίσουμε τις σταθερές, μπορούμε να βρούμε από τον τύπο (5.3.1.) το κινηματικό ιξώδες για κάθε θερμοκρασία του λαδιού.

Στο Σχ. 5.2 φαίνεται η μεταβολή του ιξώδους SAYBOLT σε σχέση με τη θερμοκρασία για κάποιο συγκεκριμένο λάδι, σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Με διαγράμματα όπως αυτό του Σχ. 5.2 μπορούμε να προσδιορίσουμε τις τιμές του ιξώδους για κάθε θερμοκρασία.



Σχ. 5.2



Σχ. 5.3

Η ASTM έχει κατασκευάσει ειδικούς χάρτες (Σχ. 5.3), όπου η μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία παριστάνεται με ευθεία γραμμή. Έτσι μπορούμε για ένα συγκεκριμένο λάδι να προσδιορίσουμε το ιξώδες για δύο θερμοκρασίες, να σημειώσουμε τα δύο σημεία του χάρτη και να φέρουμε την

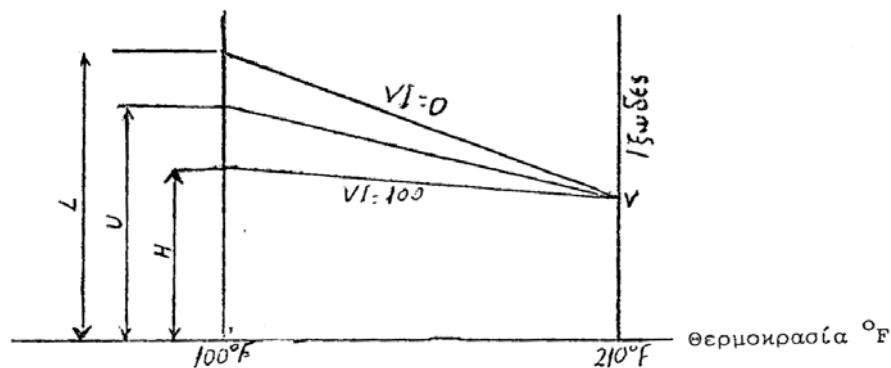
ευθεία που ενώνει τα δύο σημεία. Η ευθεία που κατασκευάσαμε θα μας δίνει τις τιμές του ιξώδους για κάθε θερμοκρασία.

Η ASTM έχει εκδώσει χάρτες για κινηματικό ιξώδες και για ιξώδες SAYBOLT, μικρού και μεγάλου μεγέθους, για να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.4. ΔΕΙΚΤΗΣ ΙΞΩΔΟΥΣ

Ο δείκτης ιξώδους (VI) εκφράζει την αντίσταση του λαδιού στη μεταβολή του ιξώδους του με τη θερμοκρασία.

Οι DEAN και DAVIS πήραν μια σειρά ορυκτελαίων Πενσυλβανικής προέλευσης, που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αντίσταση στη μεταβολή του ιξώδους τους με την θερμοκρασία. Μέτρησαν το ιξώδες αυτών στις θερμοκρασίες των 100° F και 210° F και έδωσαν στα πρότυπα αυτά ορυκτέλαια τιμή δείκτη ιξώδους VI = 100. Επίσης πήραν ορυκτέλαια προέλευσης Μεξικανικού κόλπου που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση στην μεταβολή του ιξώδους τους με την θερμοκρασία. Στα ορυκτέλαια αυτά έδωσαν τιμή δείκτη ιξώδους VI=0. Άρα κάθε ορυκτέλαιο που έχει ενδιαμέση αντίσταση και το αυτό ιξώδες στους 210° F με τα πρότυπα λάδια πρέπει να έχει τιμή ιξώδους στους 100° F ενδιαμέση των τιμών των προτύπων λαδιών.



Σχ. 5.4

Οι DEAN και DAVIS όρισαν την τιμή του δείκτη ιξώδους VI από τον τύπο:

$$VI = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 = \frac{L-U}{D} \cdot 100 \quad (5.4.1.)$$

όπου:

L, U, H : τα μεγέθη που φαίνονται στο Σχ. 5.4

$$D = L-H$$

Άρα δείκτης ιξώδους λαδιού είναι η επί της εκατό ανοιγμένη πτώση του ιξώδους του στους 100°F , σε σχέση με την πτώση δύο πρότυπων λαδιών που έχουν το ίδιο ιξώδες με το εξεταζόμενο λάδι στους 210°F .

Σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω ο δείκτης ιξώδους VI παίρνει τιμές από 0 έως 100. Με την εφαρμογή όμως βελτιωμένων μεθόδων διύλισης και την προσθήκη ειδικών προσθέτων, έχουν κατασκευαστεί λάδια με δείκτη ιξώδους μεγαλύτερο του 100. Επίσης υπάρχουν και λάδια με δείκτη ιξώδους αρνητικό αριθμό.

Για να υπολογίσουμε το VI ενός λαδιού πρέπει:

- Να προσδιορίσουμε το κινηματικό ιξώδες του στους 100°F και 210°F .
- Να πάρουμε τις τιμές των L, H και D από τον πίνακα 5.2, για κινηματικό στους 210°F αυτό που προσδιορίσαμε.
- Να υπολογίσουμε το VI από τον τύπο (5.4.1.).

Πίνακας 5.2

γ_{10}	L	D	H	γ_{10}	L	D	H	γ_{10}	L	D	H	γ_{10}	L	D	H
2-00	8-316	1-745	6-631	10-00	162-89	73-59	69-30	18-08	456-9	243-9	213-0	35-0	1539-3	855-9	583-4
2-10	9-041	1-905	7-156	10-10	165-78	75-17	70-61	18-18	461-3	248-7	218-8	35-5	1572-0	885-3	598-7
2-20	9-771	2-073	7-698	10-20	168-71	76-76	71-95	18-28	466-1	254-5	224-6	36-0	1623-3	903-8	609-5
2-30	10-507	2-249	8-258	10-30	171-59	78-32	73-27	18-38	470-6	260-2	230-2	36-5	1665-0	924-6	623-4
2-40	11-267	2-429	8-838	10-40	174-31	79-90	74-61	18-48	475-2	265-0	235-0	37-0	1707-3	947-9	635-4
2-50	12-033	2-617	9-436	10-50	177-48	81-52	75-96	18-58	479-9	270-9	240-0	37-5	1749-9	969-4	648-5
2-60	12-845	2-814	10-051	10-60	180-39	83-10	77-29	18-68	484-5	276-7	245-8	38-0	1793-1	993-3	661-6
2-70	13-703	3-017	10-685	10-70	183-33	84-70	78-63	18-78	489-1	282-6	250-6	38-5	1838-7	1018-2	675-5
2-80	14-583	3-225	11-338	10-80	186-30	86-32	79-98	18-88	493-9	288-6	255-6	39-0	1882-9	1044-0	688-9
2-90	15-493	3-442	12-009	10-90	189-30	87-95	81-35	18-98	498-4	294-6	260-6	39-5	1927-5	1069-2	702-3
3-00	16-364	3-667	12-697	11-00	192-30	89-61	82-69	19-08	503-3	300-3	265-0	40-0	1972-7	1095-9	715-8
3-10	17-303	3-898	13-404	11-10	195-36	91-29	84-07	19-18	508-1	306-1	270-3	40-5	2018-4	1122-9	729-3
3-20	18-245	4-132	14-130	11-20	198-47	93-00	85-45	19-28	513-0	311-1	275-3	41-0	2064-6	1150-1	743-3
3-30	19-254	4-379	14-875	11-30	201-62	94-74	86-88	19-38	517-9	316-3	280-6	41-5	2111-2	1177-9	757-4
3-40	20-298	4-630	15-638	11-40	204-71	96-45	88-26	19-48	522-8	321-6	285-6	42-0	2158-9	1205-6	771-5
3-50	21-307	4-889	16-418	11-50	207-82	98-17	89-65	19-58	527-7	327-7	290-6	42-5	2207-3	1234-0	785-5
3-60	22-373	5-156	17-217	11-60	210-95	99-90	91-05	19-68	532-6	333-6	295-6	43-0	2255-9	1262-9	799-6
3-70	23-403	5-438	18-034	11-70	214-12	101-67	92-45	19-78	537-5	339-6	300-6	43-5	2305-4	1291-3	814-6
3-80	24-478	5-708	18-870	11-80	217-32	103-44	93-88	19-88	542-5	345-6	305-6	44-0	2355-6	1320-6	829-6
3-90	25-578	5-994	19-724	11-90	220-48	105-21	95-27	19-98	547-4	351-6	310-6	44-5	2406-7	1350-6	844-8
4-00	26-69	6-30	20-593	12-00	223-68	106-99	96-66	20-08	552-4	357-7	315-6	45-0	2458-1	1380-3	859-8
4-10	27-814	6-60	21-447	12-10	226-99	108-84	98-15	20-18	557-3	363-7	320-6	45-5	2510-7	1410-3	874-8
4-20	28-42	7-12	22-329	12-20	230-33	110-71	99-62	20-28	562-3	369-7	325-6	46-0	2563-7	1440-6	889-8
4-30	30-83	7-60	23-232	12-30	233-68	112-57	101-06	20-38	567-3	375-7	330-6	46-5	2617-1	1471-7	904-8
4-40	32-29	8-14	24-155	12-40	236-95	114-44	122-31	20-48	572-3	381-7	335-6	47-0	2671-9	1502-6	919-8
4-50	33-85	8-75	25-098	12-50	240-31	116-33	123-98	20-58	577-3	387-7	340-6	47-5	2727-4	1533-9	934-8
4-60	35-49	9-43	26-061	12-60	243-70	118-24	125-46	20-68	582-3	393-7	345-6	48-0	2783-8	1565-6	949-8
4-70	37-21	10-17	27-044	12-70	247-06	120-14	126-92	20-78	587-3	399-7	350-6	48-5	2840-9	1597-9	964-8
4-80	39-00	10-95	28-047	12-80	250-46	122-07	128-39	20-88	592-3	405-7	355-6	49-0	2898-7	1630-6	979-8
4-90	40-85	11-78	29-070	12-90	253-89	124-01	129-88	20-98	597-3	411-7	360-6	49-5	2957-1	1663-9	994-8
5-00	42-74	12-63	30-11	13-00	257-32	125-96	131-36	21-08	602-3	417-7	365-6	50-0	3016-9	1697-9	1009-8
5-10	44-68	13-52	31-16	13-10	260-81	127-95	132-86	21-18	607-3	423-7	370-6	50-5	3076-9	1732-9	1024-8
5-20	46-64	14-42	32-22	13-20	264-36	129-97	134-39	21-28	612-3	429-7	375-6	51-0	3137-9	1768-9	1039-8
5-30	48-62	15-34	33-28	13-30	267-94	132-01	135-93	21-38	617-3	435-7	380-6	51-5	3199-9	1805-9	1054-8
5-40	50-61	16-27	34-34	13-40	271-47	134-03	137-44	21-48	622-3	441-7	385-6	52-0	3262-9	1842-9	1069-8
5-50	52-61	17-21	35-40	13-50	275-04	136-08	138-96	21-58	627-3	447-7	390-6	52-5	3326-9	1880-9	1084-8
5-60	54-61	18-15	36-46	13-60	278-61	138-13	140-48	21-68	632-3	453-7	395-6	53-0	3391-9	1918-9	1099-8
5-70	56-61	19-09	37-52	13-70	282-21	140-20	142-01	21-78	637-3	459-7	400-6	53-5	3456-9	1956-9	1114-8
5-80	58-61	20-03	38-58	13-80	285-85	142-29	143-55	21-88	642-3	465-7	405-6	54-0	3522-9	1995-9	1129-8
5-90	60-61	20-97	39-64	13-90	289-45	144-36	145-08	21-98	647-3	471-7	410-6	54-5	3588-9	2034-9	1144-8
6-00	62-61	21-91	40-70	14-00	293-07	146-45	146-62	22-08	652-3	477-7	415-6	55-0	3654-9	2073-9	1159-8
6-10	64-61	22-85	41-76	14-10	296-75	148-58	148-17	22-18	657-3	483-7	420-6	55-5	3721-9	2112-9	1174-8
6-20	66-61	23-79	42-82	14-20	300-45	150-73	149-72	22-28	662-3	489-7	425-6	56-0	3788-9	2151-9	1189-8
6-30	68-61	24-72	43-89	14-30	304-11	152-90	151-26	22-38	667-3	495-7	430-6	56-5	3855-9	2190-9	1204-8
6-40	70-62	25-66	44-96	14-40	307-78	154-93	152-80	22-48	672-3	501-7	435-6	57-0	3922-9	2229-9	1219-8
6-50	72-66	26-61	46-03	14-50	311-51	157-15	154-36	22-58	677-3	507-7	440-6	57-5	3990-9	2268-9	1234-8
6-60	74-71	27-60	47-17	14-60	315-26	159-33	155-93	22-68	682-3	513-7	445-6	58-0	4058-9	2307-9	1249-8
6-70	76-79	28-63	48-32	14-70	318-97	161-49	157-48	22-78	687-3	519-7	450-6	58-5	4126-9	2346-9	1264-8
6-80	78-81	29-62	49-49	14-80	322-75	163-70	159-05	22-88	692-3	525-7	455-6	59-0	4194-9	2385-9	1279-8
6-90	81-73	31-03	50-70	14-90	326-54	165-92	160-62	22-98	697-3	531-7	460-6	59-5	4262-9	2424-9	1294-8
7-00	84-22	32-31	51-91	15-00	330-34	168-14	162-20	23-08	702-3	537-7	465-6	60-0	4330-9	2463-9	1309-8
7-10	86-77	33-69	53-08	15-10	334-26	170-44	163-82	23-18	707-3	543-7	470-6	60-5	4398-9	2502-9	1324-8
7-20	89-36	35-12	54-34	15-20	338-19	172-75	165-44	23-28	712-3	549-7	475-6	61-0	4466-9	2541-9	1339-8
7-30	91-93	36-55	55-58	15-30	342-09	175-05	167-04	23-38	717-3	555-7	480-6	61-5	4534-9	2580-9	1354-8
7-40	94-37	37-80	56-57	15-40	345-89	177-24	168-65	23-48	722-3	561-7	485-6	62-0	4602-9	2619-9	1369-8
7-50	96-80	39-03	57-77	15-50	349-67	179-59	170-28	23-58	727-3	567-7	490-6	62-5	4670-9	2658-9	1384-8
7-60	99-23	40-26	58-97	15-60	353-97	182-06	171-91	23-68	732-3	573-7	495-6	63-0	4738-9	2697-9	1399-8
7-70	101-69	41-51	60-18	15-70	357-92	184-39	173-53	23-78	737-3	579-7	500-6	63-5	4806-9	2736-9	1414-8
7-80	104-21	42-80	61-41	15-80	361-94	186-77	175-17	23-88	742-3	585-7	505-6	64-0	4874-9	2775-9	1429-8
7-90	106-67	44-05	62-63	15-90	365-97	189-14	176-81	23-98	747-3	591-7	510-6	64-5	4942-9	2814-9	1444-8
8-00	109-16	45-32	63-84	16-00	370-02	191-56	178-46	24-08	752-3	597-7	515-6	65-0	5010-9	2853-9	1459-8
8-10	111-75	46-66	65-09	16-10	374-19	194-04	180-15	24-18	757-3	603-7	520-6	65-5	5078-9	2892-9	1474-8
8-20	114-30	48-01	66-37	16-20	378-37	196-53	181-84	24-28	762-3	609-7	525-6	66-0	5146-9	2931-9	1489-8
8-30	116-92	49-36	67-62	16-30	382-52	199-99	183-33	24-38	767-3	615-7	530-6	66-5	5214-9	2970-9	1504-8
8-40	119-63	50-73	68-88	16-40	386-68	201-47	185-21	24-48	772-3	621-7	535-6	67-0	5282-9	3009-9	1519-8
8-50	122-24	52-08	70-16	16-50	390-91	204-02	186-87	24-58	777-3	627-7	540-6	67-5	5350-9	3048-9	1534-8
8-60	124-85	53-44	71-41	16-60	395-15	206-56	188-99	24-68	782-3	633-7	545-6	68-0	5418-9	3087-9	1549-8
8-70	127-48	54-82	72-66	16-70	399-35	209-07	190-38	24-78	787-3	639-7	550-6	68-5	5486-9	3126-9	1564-8
8-80	130-14	56-22	73-92	16-80	403-63	211-64	191-99	24-88	792-3	645-7	555-6	69-0	5554-9	3165-9	1579-8
8-90	132-83	57-64	75-21	16-90	407-92	214-22	193-70	24-98	797-3	651-7	560-6	69-5	5622-9	3204-9	1594-8
9-00	135-51	59-04	76-47	17-00	412-22	216-81	195-41	25-08	802-3	657-7	565-6	70-0	5690-9	3243-9	1609-8
9-10	138-18	60-44	77-74	17-10	416-60	219-45	197-15	25-18	807-3	663-7	570-6	70-5	5758-9	3282-9	1624-8
9-20	140-88	6													

Υπάρχουν πίνακες αντίστοιχοι του πίνακα 5.2 που δίνουν το ιξώδες σε SAYBOLT UNIVERSAL.

Ο τρόπος αυτός υπολογισμού του VI ισχύει για τιμές μέχρι 100. Αν το VI είναι μεγαλύτερο του 100, τότε ο υπολογισμός του δεν γίνεται από τον τύπο (5.4.1.), αλλά από τον τύπο (5.4.4.)

$$VI = 100 - \frac{\log N + 1}{0,0075} \quad (5.4.4.)$$

όπου:

$$N = \frac{\log H - \log U}{\log V_{210}}$$

V_{210} = κινηματικό ιξώδες στους 210° F.

5.5. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΟΡΥΚΤΕΛΑΙΩΝ

Η SAE έχει καθιερώσει κλίμακα, που κατατάσσει τα λάδια και τις βαλβολίνες των αυτοκινήτων σε βαθμίδες ιξώδους. Η ταξινόμηση της SAE είναι ποσοτική ταξινόμηση, αποκλειστικά και μόνο με βάση το ιξώδες και καθόλου ενδεικτική της ποιότητας.

Στους πίνακες 5.3, 5.4 και 5.5 φαίνεται η ταξινόμηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάταξη των λαδιών είναι τελείως διαφορετική από την κατάταξη των βαλβολινών. Από τους πίνακες βλέπουμε ότι λάδι 40 SAE αντιστοιχεί περίπου με μια βαλβολίνη 90 SAE. Έτσι εξηγείται το ότι μερικές φορές το λάδι του κινητήρα μπορεί να λιπαίνει το κιβώτιο ταχυτήτων.

Πίνακας 5.3

Κατάταξη ορυκτέλαιων κατά SAE (j300d)

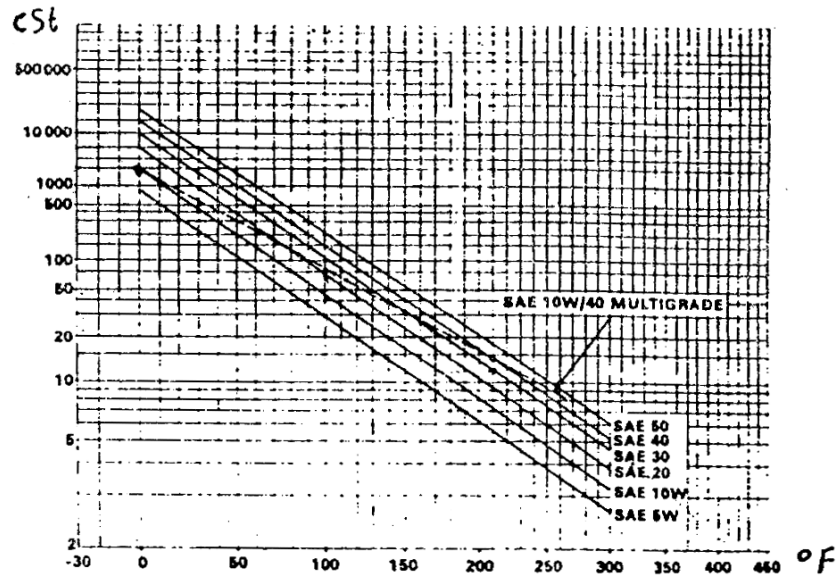
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΞΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑ SAE	ΙΞΩΔΕΣ	
	Centipoise (CP) ΣΤΟΥΣ -18° C (ASTM D2602), Max	Centistokes (CST) ΣΤΟΥΣ 100° C (ASTM D445)
		Min Max
5W	1.250	3,8 -
10W	2.500	4,1 -
20W	10.000	5,6 -
20	-	5,6 μικρότερο από 9,3
30	-	9,3 μικρότερο από 12,5
40	-	12,5 μικρότερο από 16,3
50	-	16,3 μικρότερο από 21,9

Πίνακας 5.4
Κατάταξη ορυκτέλαιων κατά SAE (j300e)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΞΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑ SAE	ΙΞΩΔΕΣ			ΟΡΙΟ ΑΝΤΛΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (ASTM D – 3829)
	ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (C.C.S.)	ΣΤΟΥΣ 100° C (ASTM D-445)		
	CP MAX, °C	CST Min Max	°C, Max	
0W	3250 ΣΕ – 30	3,8	-	-35
5W	3500 ΣΕ – 25	3,8	-	-30
10W	3500 ΣΕ – 20	4,1	-	-25
15W	3500 ΣΕ – 15	5,6	-	-20
20W	4500 ΣΕ – 10	5,6	-	-15
25W	5000 ΣΕ – 5	9,3	-	-10
20	-	5,6	9,3	-
30	-	9,3	12,5	-
40	-	12,5	16,3	-
50	-	16,3	21,9	-

Πίνακας 5.5
Κατάταξη βαλβολινών κατά SAE (j300c)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΞΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑ SAE	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ ΙΞΩΔΕΣ 150000 CP , 9° C	ΙΞΩΔΕΣ ΣΤΟΥΣ 100° C		
		CST	Min	Max
75W	-40	4,1	-	-
80W	-26	7,0	-	-
85W	-12	11,0	-	-
90	-	13,5	< 24,0	< 41,0
140	-	24,0	< 41,0	< 41,0
250	-	41,0		



Σχ. 5.5

Με τη βοήθεια προσθετικών ουσιών κατασκευάστηκαν λάδια που τα ιξωδομετρικά χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερες βαθμίδες ιξώδους κατά SAE (Σχ. 5.5). Τα λάδια αυτά τα ονομάζουμε πολύτυπα λάδια (MULTIGRADE OILS). Με αυτά τα λάδια ένας κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει χωρίς πρόβλημα τόσο στις χαμηλές θερμοκρασίες όσο και στις υψηλές θερμοκρασίες. Στις χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα δεν έχουμε πρόβλημα εκκίνησης και στις υψηλές του καλοκαιριού δεν έχουμε υπερθέρμανση και υπερβολική κατανάλωση.

Η ταξινόμηση των λαδιών των MEK κατά API είναι μια καθαρά ποιοτική κατάταξη και καλύπτει όλες τις ποιότητες λαδιών, από τα λιγότερο ως τα περισσότερο ενισχυμένα.

Πίνακας 5.6

Κατάταξη κατά API των λαδιών βενζινοκινητήρων

ΠΑΛΙΑ ΣΥΜΒΟΛΑ	ΝΕΑ ΣΥΜΒΟΛΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
API	API	
ML	SA	Λάδι χωρίς καθόλου πρόσθετα. Αυτή η κατηγορία δεν έχει καμιά ποιοτική απαίτηση και τα λάδια που υπάγονται σε αυτή, πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο μετά από σύσταση του κατασκευαστή του μηχανήματος.
MM	SB	Λάδι που περιέχει πρόσθετα αντισ-

MS(1964)	SC	ξειδωτικά και προστασίας από διάβρωση των κουζινέτων. Κι αυτά τα λάδια πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο μετά από σύσταση του κατασκευαστή. Λάδι που περιέχει πρόσθετα κατά της δημιουργίας ψυχρών και θερμών καταλοίπων, εναντίον της φθοράς (πρόσθετα υψηλής πίεσης), εναντίον της σκουριάς και κατά της διάβρωσης των κουζινέτων. Αυτά τα λάδια είναι κατάλληλα για τους βενζινοκινητήρες που κατασκευάστηκαν από το 1964 ως 1967.
MS(1968)	SD	Λάδι που περιέχει τα ίδια πρόσθετα με το προηγούμενο, αλλά σε τέτοιες αναλογίες και ποιότητες που να μπορεί να ανταποκρίνεται σε δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται σε μοντέλα από το 1968 ως το 1970, αλλά και σε μοντέλα του 1971 μετά από σύσταση του κατασκευαστή. Τα λάδια SD μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην θέση των SC.
	SE	Ακόμη πιο ενισχυμένα λάδια για πιο βαρείς συνθήκες λειτουργίας. Τα πρόσθετα είναι τα ίδια με των κατηγοριών SC και SD και η κατηγορία SE μπορεί να αντικαταστήσει τις δυο προηγούμενες. Συνιστάται για μοντέλα από το 1972 και μετά.
	SF	Είναι η πρόσφατη (1980) κατηγορία κατά API και καλύπτει ακόμη βαρύτερες συνθήκες λειτουργίας. Τα όρια για τα διάφορα τεστ είναι ακόμη πιο αυστηρά και τα λάδια αυτής της κατηγορίας μπορούν να χρησιμοποιούνται σε όλα τα μοντέλα από το 1980 και μετά.

Πίνακας 5.7
Κατάταξη κατά API των λαδιών πετρελαιοκινητήρων

ΠΑΛΙΑ ΣΥΜΒΟΛΑ API	ΝΕΑ ΣΥΜΒΟΛΑ API	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
DG	CA	Λάδια για πολύ ελαφρές συνθήκες λειτουργίας και για μηχανές που χρησιμοποιούν καύσιμο πολύ καλής ποιότητας. Περιέχουν πρόσθετα κατά της διάβρωσης των κουζινέτων και κατά της δημιουργίας κατάλοιπων στα ελατήρια. Αυτά τα λάδια χρησιμοποιήθηκαν πολύ μεταξύ 1940 και 1950, αλλά τώρα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο μετά από σύσταση του κατασκευαστή.
DM	DB	Λάδια για μέτριες συνθήκες λειτουργίας σε μηχανές που καίνε καύσιμο χαμηλότερης ποιότητας, γεγονός που προϋποθέτει καλύτερη προστασία από την φθορά και τη δημιουργία κατάλοιπων. Επίσης πρέπει να παρέχεται προστασία κατά της διάβρωσης των κουζινέτων και των καταλοίπων που δημιουργούνται σε υψηλές θερμοκρασίες.
DM	CC	Λάδια για μέτριες μέχρι βαρείς συνθήκες λειτουργίας και για κινητήρες με τουρμποτσάρτζερ υπερπληρωτή. Περιέχουν πρόσθετα κατά της διάβρωσης των κουζινέτων, κατά της δημιουργίας κατάλοιπων σε υψηλές θερμοκρασίες και κατά της σκουριάς της διάβρωσης και των κατάλοιπων. Τα λάδια αυτά χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1961.
DS	CD	Λάδια για δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας βενζινοκινητήρων και πετρελαιοκινητήρων, που χρησιμοποιούν καύσιμο οποιασδήποτε ποιότητας. Περιέχουν πρόσθετα κατά της φθοράς, των καταλοίπων σε ψηλές θερμοκρασίες και κατά της διάβρωσης των κουζινέτων. Για πρώτη φορά αυτά τα λάδια χρησιμοποιήθηκαν το 1955.

Πίνακας 5.8
Κατάταξη βαλβολινών κατά API

ΟΝΟΜΑΣΙΑ API	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
API-GL-1	Για ελικοειδή κωνικά γρανάζια και ατέρμονες και για μερικά χειροκίνητα σασμάν, που λειτουργούν κάτω από τέτοιες ελαφρές συνθήκες όσον αφορά στα φορτία και στις ταχύτητες ολίσθησης, ώστε λάδια χωρίς πρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν άφοβα. Παρόλα αυτά στα λάδια αυτής της κατηγορίας μπορεί να χρησιμοποιηθούν αντιοξειδωτικά, αντιαφριστικά, αντισκωριακά και βελτιωτικά του σημείου πήξης. Αντίθετα απαγορεύεται η χρήση προσθέτων υψηλής πίεσης και βελτιωτικών των ιδιοτήτων τριβής.
API-GL-2	Είναι για λιπαντικά για ατέρμονες πιο ενισχυμένα από τα προηγούμενα και που τα επιβάλλουν οι συνθήκες φορτίου, θερμοκρασίας και ταχύτητας ολίσθησης.
API-GL-3	Λιπαντικά για ελικοειδή κωνικά γρανάζια και χειροκίνητα σασμάν που λειτουργούν κάτω από μέτριες συνθήκες λειτουργίας όσον αφορά την ταχύτητα και τα φορτία.
API-GL-4	Λάδια για υποειδή γρανάζια, για I.X. αυτοκίνητα και εξοπλισμό αυτοκινήτων που λειτουργούν με μεγάλες ταχύτητες ή μεγάλη ροπή ή χαμηλή ροπή και χαμηλή ταχύτητα.
API-GL-5	Λάδια για υποειδή γρανάζια που λειτουργούν κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες: υψηλή ταχύτητα και απότομα φορτία ή υψηλή ταχύτητα και χαμηλή ροπή ή χαμηλή ταχύτητα και υψηλή ροπή. Η προδιαγραφή αυτή, όπως και η προηγούμενη GL-4, καλύπτουν τις περισσότερες από τις περιπτώσεις λίπανσης γραναζιών στα αυτοκίνητα και λιπαντικά που ανταποκρίνονται σε αυτές βρίσκονται σε όλους τους σταθμούς εξυπηρέτησης.

Η αρχική κατάταξη περιείχε τρεις κατηγορίες λαδιών για βενζινοκινητήρες (ML, KK και MS) και δυο πετρελαιοκινητήρες (DG και DS). Αργότερα προστέθηκε και τρίτη κατηγορία για λάδια πετρελαιοκινητήρων η DM και το 1969 καταργήθηκε η ML.

Ο τρόπος ταξινόμησης όμως, δημιουργούσε ορισμένα προβλήματα, έτσι οι API, ASTM και SAE έκαναν μια οργανωμένη και ρεαλιστική ταξινόμηση. Η νέα ταξινόμηση κατά API έγινε το 1970 και περιλαμβάνει δυο κατηγορίες λαδιών, μια για βενζινοκινητήρες (με το χαρακτηριστικό γράμμα S) και μια για πετρελαιοκινητήρες (με το γράμμα C).

Στους πίνακες 5.6 και 5.7 δίνονται οι διάφοροι χαρακτηρισμοί των λαδιών κατά API και τι σημαίνουν στην πράξη.

Για να ταξινομηθεί ένα λάδι σε μια κατηγορία API, πρέπει να περάσει, από σειρά μηχανικών δοκιμών που προδιαγράφονται για την κατηγορία του.

Ένα λάδι για πετρελαιοκινητήρες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε βενζινοκινητήρες, ενώ το αντίστροφο κατά κανόνα δεν ισχύει. Έτσι μπορούμε να βρούμε λάδι ταυτόχρονα CD και SE κατά API, που σημαίνει ότι το λάδι, μπορεί να ανταποκριθεί στις πιο βαρείς συνθήκες λειτουργίας πετρελαιοκινητήρων και βενζινοκινητήρων.

Ορίζοντας τον αριθμό κατά SAE ενός λαδιού (π.χ. SAE 20W ή SAE 40W ή SAE 10W/40) και την ποιότητα κατά API (π.χ. SC/CC), μπορούμε να βρούμε ένα συγκεκριμένο λάδι κάποιας εταιρείας, από αυτά που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Πρέπει να τονισθεί ότι αυτό που παίζει τον σημαντικότερο ρόλο, είναι η ποιοτική προδιαγραφή κατά API και λιγότερο το ιξώδες (ιδιαίτερα τώρα που τα πολύτυπα λάδια κερδίζουν συνέχεια έδαφος). Γι' αυτό πάνω στην οποιαδήποτε συσκευασία των λαδιών, πρέπει υποχρεωτικά να γράφεται τουλάχιστον η προδιαγραφή κατά API, που δίνει στον αγοραστή συγκεκριμένη και εγγυημένη πληροφόρηση για την ποιότητα του λαδιού που αγοράζει.

Όπως έγινε ταξινόμηση των λαδιών των MEK, έτσι έγινε και για τις βαλβολίνες ταξινόμησή τους κατά API (πίνακας 5.8). Η βάση της ταξινόμησης των βαλβολινών κατά API, είναι η απόδοση του λιπαντικού, για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του αυτοκινήτου. Οι διάφορες κατηγορίες κατά API καλύπτουν επίσης και την πιθανότητα που έχει ένα λιπαντικό να ανταποκρίνεται σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, για διάφορους τύπους μετάδοσης κίνησης.

5.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟ ΙΞΩΔΕΣ

Στα λιπαντικά κατά τη διάρκεια χρησιμοποίησής τους αναπτύσσονται πιέσεις, που σαν αποτέλεσμα έχουν την αύξηση του ιξώδους.

Από πειράματα που έγιναν βρέθηκε ότι η μεταβολή του ιξώδους σε σχέση με την πίεση δίνεται από τον τύπο (5.6.1.)

$$\eta_p = \eta_o \cdot e^{bp}$$

όπου:

η_p : το δυναμικό ιξώδες σε πίεση P

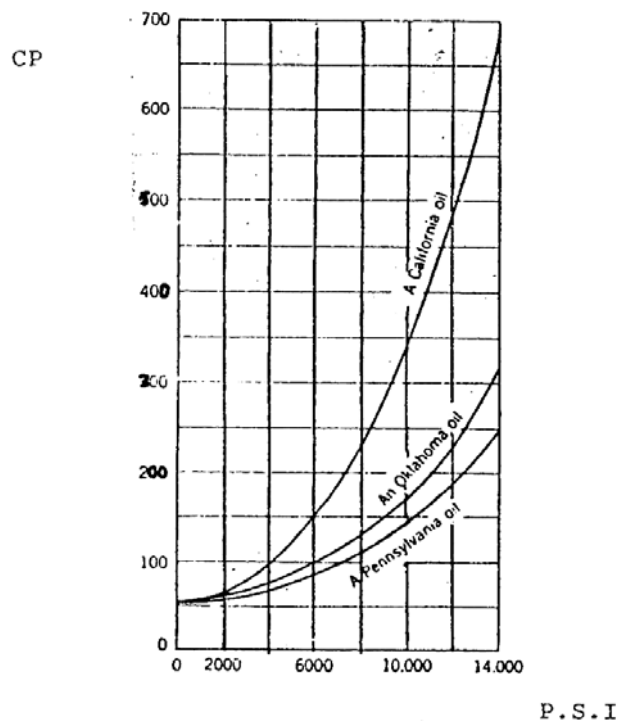
η_o : το δυναμικό ιξώδες σε ατμοσφαιρική πίεση

p : η πίεση σε ατμόσφαιρες

b : σταθερά

e : η βάση των νεπερίων λογαρίθμων περίπου ίσο με 2,718

Στο Σχ. 5.6 φαίνεται η μεταβολή του ιξώδους με την πίεση, για λάδια Καλιφόρνιας, Οκλαχόμας και Πενσυλβανίας.



Σχ. 5.6

Τα λάδια Καλιφόρνιας έχουν χαμηλό δείκτη ιξώδους VI, ενώ της Οκλαχόμα υψηλό και της Πενσυλβανίας ακόμη υψηλότερο. Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.6, η επίδραση της πίεσης στο ιξώδες είναι μεγαλύτερη για τα λάδια με μικρό δείκτη ιξώδους, σε σχέση με τα λάδια που έχουν μεγαλύτερο δείκτη ιξώδους.

Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της επίδρασης της πίεσης στο ιξώδες μπορούμε να πούμε ότι:

- Η αύξηση του ιξώδους που γίνεται με την μείωση της θερμοκρασίας από τους 210° F μέχρι τους 100° F, είναι ίδια με την αύξηση που παίρνουμε όταν αυξήσουμε την πίεση από την ατμοσφαιρική στους 20.000 P.S.I.
- Για λάδια υψηλού VI έχουμε διπλασιασμό του ιξώδους όταν αυξηθεί η πίεση από την ατμοσφαιρική στα 5000 P.S.I.

5.7. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΙΞΩΔΕΣ

Τα ορυκτέλαια σαν νευτώνεια υγρά, έχουν ιξώδες που είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα απόσχισης, στις συνθήκες πρακτικής εφαρμογής τους. Για πολύ υψηλές ταχύτητες απόσχισης (πάνω από 10^6 sec^{-1}) η τιμή του ιξώδους είναι ελαφρά μικρότερη από ότι είναι στις χαμηλές ταχύτητες. Η απόκλιση αυτή όμως είναι μεγαλύτερη σε ορυκτέλαια που έχουν μακρομοριακά πολυμερή πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά τα χρησιμοποιούμε συνήθως για την βελτίωση του δείκτη ιξώδους αυτών. Τα λάδια που έχουν αυτά τα πρόσθετα, δεν θεωρούνται νευτώνεια υγρά.

Τα γράσσα, σε αντίθεση με τα λάδια, απαιτούν μια αρχική τάση απόσχισης για να αρχίσει η ροή. Το ιξώδες τους δεν είναι σταθερό, αλλά παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με την ταχύτητα απόσχισης.

Στις περιπτώσεις αυτές το ιξώδες ονομάζεται φαινομενικό ιξώδες και πρέπει πάντα να συνοδεύεται με την ταχύτητα απόσχισης που μετρήθηκε.

6. ΛΙΠΑΝΣΗ

6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Λίπανση ονομάζουμε κάθε ενέργεια που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία λιπαντικού στρώματος μεταξύ δύο τριβομένων επιφανειών, με επακόλουθο την μείωση της τριβής και της φθοράς των επιφανειών.

Κατά την λίπανση χρησιμοποιούμε τα λιπαντικά με αποτέλεσμα την μετατροπή της ξηρής τριβής δύο επιφανειών σε υγρή. Έτσι ελαττώνουμε κατά πολύ την τριβή και την φθορά των επιφανειών.

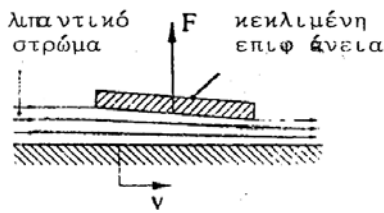
Το λιπαντικό στρώμα που δημιουργείται εξισορροπεί όλα τα φορτία που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών. Ανάλογα με το πως δημιουργείται το λιπαντικό στρώμα και πως αντιμετωπίζει τα φορτία, διακρίνουμε τα παρακάτω είδη λίπανσης:

- Υδροδυναμική λίπανση
- Υδροστατική λίπανση
- Οριακή λίπανση
- Ελαστοϋδροδυναμική λίπανση.

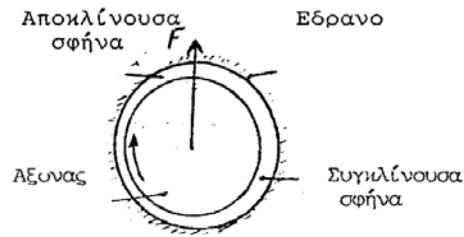
6.2. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΛΙΠΑΝΣΗ

Κατά την υδροδυναμική λίπανση, το λιπαντικό στρώμα και η πίεση που αναπτύσσεται είναι αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των λιπαινόμενων επιφανειών. Οι επιφάνειες δεν λιπαίνονται όταν βρίσκονται σε ακινησία. Όταν όμως υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των επιφανειών, μπορεί να δημιουργηθεί λιπαντικό στρώμα με δυνατότητα ανάπτυξης πολύ υψηλών πιέσεων, ενώ το λιπαντικό τροφοδοτείται με χαμηλή πίεση ή ακόμη και παρασύρεται από την κίνηση των επιφανειών.

Ο μηχανισμός της ανάπτυξης πίεσης ανάμεσα στις κινούμενες επιφάνειες, εξαρτάται από τη σφηνοειδή διαμόρφωση του λιπαντικού στρώματος. Στα Σχ. 6.1α και Σχ. 6.1β φαίνονται δύο κύριες διαμορφώσεις λιπαντικού στρώματος που έχουν μεγάλη τεχνολογική σημασία.



Σχ. 6.1α

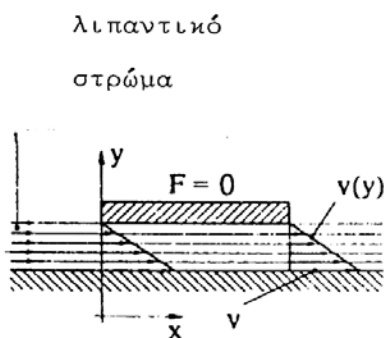


Σχ. 6.1β

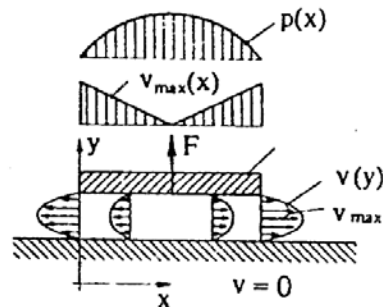
Το Σχ. 6.1α αναπαριστά μια επίπεδη επιφάνεια κινούμενη σε σχέση με μια σταθερή κεκλιμένη πλάκα. Το Σχ. 6.1β αναπαριστά ένα έδρανο με άξονα. Η εφαρμογή φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση του άξονα κατά την διεύθυνση της δύναμης, έτσι σχηματίζονται δύο σφηνοειδή κενά μεταξύ του εδράνου και του άξονα. Στο ένα, το λιπαντικό στρώμα αποκλίνει κατά την διεύθυνση της κίνησης και στο άλλο συγκλίνει. Η συγκλίνουσα σφήνα είναι αυτή που εξισορροπεί τα φορτία.

Θα εξετάσουμε πως αναπτύσσεται η πίεση στο λιπαντικό στρώμα του Σχ. 6.1α. Κάνουμε την υπόθεση ότι το πλάτος των επιφανειών είναι άπειρο και έτσι έχουμε ένα δισδιάστατο μοντέλο ροής. Για να γίνει πιο κατανοητός ο μηχανισμός ανάπτυξης της πίεσης στο μοντέλο του Σχ. 6.1α, θα εξετάσουμε πρώτα δυο άλλα μοντέλα.

Στο Σχ. 6.2α έχουμε ροή ανάμεσα σε δυο παράλληλες επιφάνειες, που η μία κινείται και δεν δέχονται φορτία. Η κατανομή της ταχύτητας είναι γραμμική και η μόνη δύναμη που αναπτύσσεται είναι αυτή που χρειάζεται για να αντεπεξέλθει στο ιξώδες του λιπαντικού. Καμία πίεση δεν αναπτύσσεται στο λιπαντικό στρώμα σαν αποτέλεσμα της κίνησης.



Σχ. 6.2α

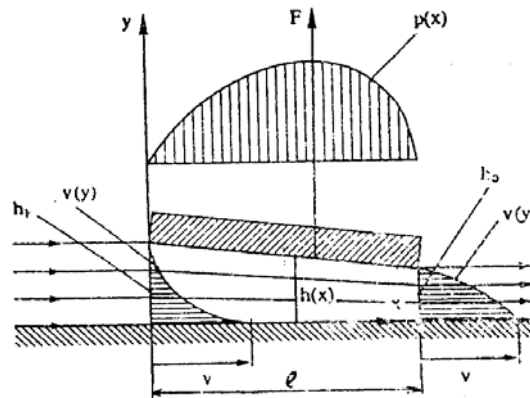


Σχ. 6.2β

Στο Σχ. 6.2β, έχουμε δυο παράλληλες επιφάνειες σε ακινησία και στην πάνω επιφάνεια εξασκείται φορτίο. Το λιπαντικό μεταξύ των επιφανειών συμπιέζεται. Η κατανομή των ταχυτήτων κατά του άξονα y είναι παραβολική

και κατά τον άξονα των x γραμμική με μηδενική τιμή στο κέντρο. Η κατανομή των πιέσεων στον άξονα x είναι παραβολική.

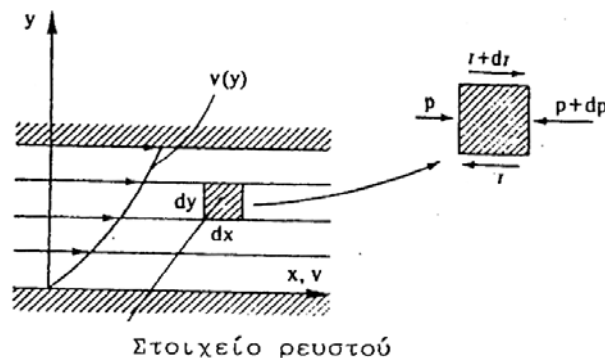
Στην υδροδυναμική λίπανση έχουμε συνδιασμό των διαμορφώσεων του Σχ. 6.2α και Σχ. 6.2β. Συνεχής τροφοδοσία γίνεται από τα αριστερά σε μια δίοδο μειωμένου εύρους. Ένα μέρος του λιπαντικού συνθλίβεται προς τα αριστερά, μειώνοντας την ποσότητα του λαδιού που εισέρχεται, ενώ ένα μέρος συνθλίβεται προς τα δεξιά, επιταχύνοντας την ροή προς αυτή την κατεύθυνση. Η συνέχεια της ροής απαιτεί να φεύγει τόση ποσότητα λιπαντικού, όση εισέρχεται (Σχ. 6.3).



Σχ. 6.3

Στο Σχ. 6.3 βλέπουμε με την μορφή που έχει η κατανομή της πίεσης που αναπτύσσεται σαν συνέπεια της ροής του λιπαντικού, όπως επίσης και την κατανομή των ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της σφήνας. Το εμβαδόν των περιοχών που είναι κάτω από κάθε καμπύλη ταχυτήτων είναι ίσο, γιατί η ποσότητα λιπαντικού που εισέρχεται πρέπει να είναι ίση με αυτή που εξέρχεται.

Είναι αναγκαίο να κάνουμε μερικές απλοποιήσεις στις υποθέσεις μας για να έχουμε μια μαθηματική λύση του προβλήματος. Η σημαντικότερη είναι ότι οι δυνάμεις αδρανείας θεωρούνται αμεληταίες, υπολογίζουμε μόνο τις δυνάμεις πίεσης και τις διατμητικές. Με αυτή την υπόθεση οι καθαρές δυνάμεις πίεσης και διάτμησης που δρουν σε ένα στοιχείο ρευστού πρέπει να είναι ίσες (Σχ. 6.4).



Σχ. 6.4

Άρα
$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{dp}{dx} \quad (6.2.1.)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Νεύτωνα:

έχουμε:
$$\tau = \eta \cdot \frac{dU}{dy} \quad (6.2.2.)$$

$$\eta \cdot \frac{d^2U^2}{dy^2} = \frac{dp}{dx} \quad (6.2.3.)$$

όπου η είναι το δυναμικό ιξώδες.

Επιπρόσθετα οι παρακάτω υποθέσεις είναι απαραίτητες:

- Το ρευστό είναι ασυμπίεστο.
- Η ροή είναι στρωτή.
- Έχουμε νευτώνειο υγρό.
- Δεν έχουμε διαφορές πίεσης κατά τον άξονα των y .
- Δεν έχουμε ολίσθηση μεταξύ ρευστού και στερεάς επιφάνειας.
- Η συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα των y θεωρείται μηδενική (γωνία σφήνας πολύ μικρή).

Καθώς το p όπως υποθέσαμε είναι ανεξάρτητο από το y μπορούμε να ολοκληρώσουμε την (6.2.3.) ως προς y για κάθε θέση του x . Έτσι παίρνουμε ένα παραβολικό διάγραμμα ταχυτήτων. Οι σταθερές του ολοκληρώματος προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες κι έτσι η διαδικασία οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dp}{dx} = 6 \eta U \left(\frac{1}{h^2} + \frac{K_1}{h^3} \right) \quad (6.2.4.)$$

όπου K_1 : σταθερά

h : το πάχος του στρώματος

Από την εξίσωση (6.2.4.) βλέπουμε, ότι για παράλληλο στρώμα (h σταθερό), η πίεση p είναι επίσης σταθερή.

Όταν έχουμε σφήνα που ορίζεται από δύο επιφάνειες έχουμε:

$$h_x = h_0 + \frac{h_1 - h_0}{l} \cdot x \quad (6.2.5.)$$

όπου: h_0 : το διάκενο στο τέλος της σφήνας

h_1 : το διάκενο στην αρχή της σφήνας

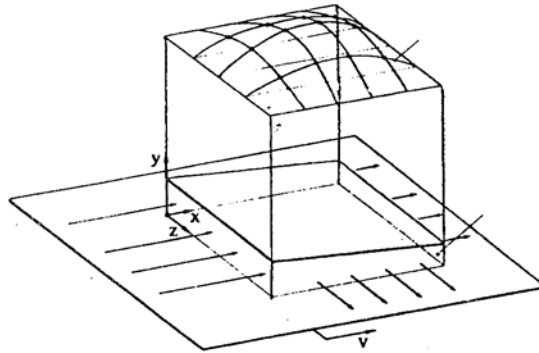
l : το μήκος της σφήνας (Σχ. 6.3)

Η εξίσωση (6.2.4.) μπορεί να ολοκληρωθεί:

Μέχρι εδώ θεωρούσαμε ότι οι επιφάνειες έχουν άπειρο πλάτος. Για επιφάνειες με πεπερασμένο πλάτος δεν πρέπει να ξεχάσουμε και την διαρροή στα άκρα. Με τους συμβολισμούς του Σχ. 6.5 η εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \eta U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (6.2.6.)$$

Αυτή είναι γνωστή και σαν εξίσωση REYNOLDS.



Σχ. 6.5

Οι λύσεις της εξίσωσης (6.2.6.) εκφραζόμενες σε αδιάστατη πίεση p^* είναι:

$$p^* = \frac{p \cdot h o^2}{\eta \cdot U \cdot l} \quad (6.2.7.)$$

Στον πίνακα 6.1 δίνονται λύσεις για την τετράγωνη πλάκα. Κ είναι ο λόγος του h_1 προς το h_o $\left(K = \frac{h_1}{h_o} \right)$

Πίνακας 6.1

Κατανομή πιέσεων στην κεντρική γραμμή τετράγωνης πλάκας

x/l	p^*			
-	$k=2$	$k=2 \frac{1}{2}$	$k=3$	$k=4$
0	0	0	0	0
1/8	0.038	0.032	0.026	0.018
2/8	0.073	0.063	0.053	0.038
3/8	0.104	0.095	0.082	0.061
4/8	0.132	0.126	0.113	0.088
5/8	0.152	0.154	0.145	0.120
6/8	0.154	0.168	0.167	0.151
7/8	0.118	0.140	0.150	0.154
1	0	0	0	0

Η p^* καθορίζει την πίεση στη διαμήκη κεντρική γραμμή της πλάκας. Η εγκάρσια κατανομή της πίεσης είναι παραβολική και μηδενίζεται στα άκρα.

Για πρακτικούς σκοπούς το ολικό φορτίο F είναι πολύ σημαντικό. Μπορεί να βρεθεί με ολοκλήρωση και εκφράζεται σε σχέση με την αδιάστατη δύναμη f^* από την εξίσωση:

$$f^* = \frac{F \cdot h_0^2}{\eta \cdot U \cdot b \cdot l^2} \quad (6.2.8.)$$

όπου:

b : το πλάτος της πλάκας

Ο πίνακας 6.2 δίνει τιμές του f^* σε σχέση με το K .

Πίνακας 6.2

$k = 1$	$1 \frac{1}{2}$	2	$2 \frac{1}{2}$	3	4	5	6
$f^* = 0$	0.056	0.069	0.070	0.067	0.058	0.050	0.043

Από την εξίσωση (6.2.8.), για συγκεκριμένη σχέση πάχους εισερχόμενου και εξερχόμενου στρώματος βγάζουμε τα παρακάτω συμπεράσματα για τη δύναμη F :

- Είναι ανάλογη με το δυναμικό ιξώδες ή την ταχύτητα U , το εμβαδόν της επιφάνειας $b \cdot l$ και το μήκος l .
- Είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου του διακένου στην έξοδο της σφήνας.

Το τελευταίο έχει μεγάλη πρακτική σημασία, γιατί αν σε έδρανο μειώσουμε το διάκενο της εξόδου στο μισό, τετραπλασιάζουμε τη δυνατότητα φόρτησής του.

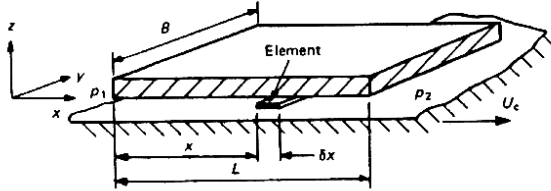
Κατά την υδροδυναμική λίπανση η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται, είναι αυτή που προκύπτει από τη διαφορά πίεσης που έχουμε κατά μήκος της σφήνας.

Άρα
$$T = \frac{\eta \cdot U \cdot b \cdot l \cdot T}{h_0} \quad (6.2.9.)$$

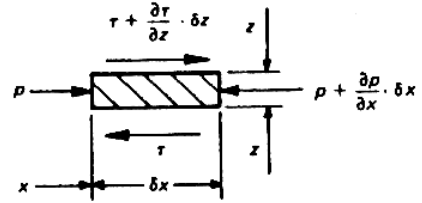
Όπως φαίνεται η δύναμη τριβής είναι ανάλογη του δυναμικού ιξώδους, της ταχύτητας και του εμβαδού της πλάκας και αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του στρώματος στην έξοδο της σφήνας.

Ο συντελεστής τριβής για υδροδυναμική λίπανση είναι πολύ μικρός (0,001 – 0,03). Από αυτό φαίνεται το πλεονέκτημα που έχουμε με την μείωση της δύναμης τριβής κατά την υδροδυναμική λίπανση.

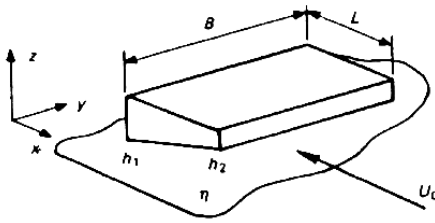
Εφαρμογές υδροδυναμικών εδράνων.



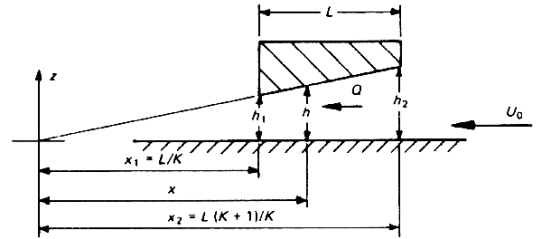
Σχ. 6.6



Σχ. 6.7



Σχ. 6.8



Σχ. 6.9

Με βάση τα σχήματα 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 έχουμε:

$$p(B\delta z) + \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial z} \cdot \delta z \right) (B\delta x) - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta x \right) (B\delta z) - \tau(B\delta x) = 0$$

$$\text{ή } \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \text{ επίσης ισχύει } \tau = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \text{ οπότε}$$

$$\eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial x} \text{ και με ολοκλήρωση } u = \left(\frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2$$

όπου C_1 και C_2 είναι σταθερές που πρόκειται να καθοριστούν. Όταν $z=0$ τότε $u=U_c$ και όταν $z=h$, $u=0$ άρα $C_1 = -\left(\frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{h}{2} - \frac{U_c}{h}$ και $C_2 = U_c$ οπότε από την ανωτέρω σχέση για u λαμβάνουμε:

$$u = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) (hz - z^2) + U_c \left(1 - \frac{z}{h} \right). \text{ Αλλά } Q = \int_0^h u B \delta z,$$

$$Q = B \int_0^h \left\{ \frac{1}{2\eta} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) (hz - z^2) + U_c \left(1 - \frac{z}{h} \right) \right\} dz \text{ ή}$$

$$Q = \frac{Bh^3}{12\eta} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{Bh}{2} U_c \quad (\text{βλ. Σχ. 6.6 και Σχ. 6.7})$$

Αναφερόμενοι τώρα τα Σχ. 6.8 και Σχ. 6.9 και δεδομένου ότι η παροχή δεν μεταβάλλεται με την απόσταση x και για ασυμπίεστο ρευστό, Q είναι σταθερό οπότε $\partial Q / \partial x$ και λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρω σχέση για Q έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{12\eta} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{h}{2} U_c \right\} = 0 \quad \text{και δεδομένου ότι } U_c \text{ δεν είναι συνάρτηση}$$

της απόστασης x λαμβάνουμε:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right\} = 6U_c \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{εξίσωση Reynolds σε μια διάσταση}).$$

Επίσης από τα Σχ. 6.8 και Σχ. 6.9 έχουμε:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_2 - h_1}{L} = \frac{h_1}{L} \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right) = \frac{h_1}{L} K \quad \text{όπου } K = \frac{h_2}{h_1} - 1.$$

Από την γεωμετρία των σχημάτων αυτών προκύπτει πως $h = h_1$ όταν $x_1 = \frac{L}{K}$, και $h = h_2$ όταν:

$$x_2 = \frac{L}{K} (K + 1). \quad \text{Αντικαθιστώντας } h = \frac{\partial h}{\partial x} x = \left(\frac{h_1 K}{L} \right) x \quad \text{και} \quad U_c = -U_0 \quad \text{στην}$$

$$\text{εξίσωση Reynolds έχουμε: } \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{h_1 K}{L} \right)^3 \frac{x^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} = -6 U_0 \left(\frac{h_1 K}{L} \right) \quad \text{ή}$$

$$\left\{ \left(\frac{h_1 K}{L} \right)^2 \frac{1}{6\eta U_0} \right\} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = -1. \quad \text{Οι εντός παρενθέσεων όροι μπορεί να}$$

θεωρηθούν σταθεροί για ένα έδρανο εάν η μεταβολή του ιξώδους με την θερμοκρασία αγνοείται σ' αυτό το στάδιο. Οπότε με διπλή ολοκλήρωση έχουμε:

$$\left\{ \frac{1}{6\eta U_0} \left(\frac{h_1}{L} \right)^2 \right\} K^2 \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{-1}{x^2} + \frac{C_3}{x^3}$$

$$\left\{ \frac{1}{6\eta U_0} \left(\frac{h_1}{L} \right)^2 \right\} K^2 p = \frac{1}{x} - \frac{C_3}{2x^2} + C_4$$

$$\text{Όταν } x_1 = \frac{L}{K}, \quad p = 0 \quad (\text{ατμοσφαιρική})$$

$$x_2 = \left(\frac{L}{K} \right) (K + 1) \quad \text{και} \quad C_4 = -\frac{K}{L} \left(\frac{1}{K + 2} \right)$$

Μέγιστη πίεση p προκύπτει όταν $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$

Οπότε $p_{\max} = \left(\frac{\eta U_0 L}{h_1} \right) \left(\frac{3K}{2(K+1)(K+2)} \right)$ σε απόσταση

$$x_{\max} = \left\{ \frac{2}{K} \left(\frac{K+1}{K+2} \right) \right\} L$$

$$h_{\max} = \left(\frac{h_1 K}{L} \right) x_{\max} = \left\{ 2 \left(\frac{K+1}{K+2} \right) \right\} h_1$$

Ολικό φορτίο μεταφερόμενο υπό του εδράνου

$$W = \int_{x_1}^{x_2} p B dx = \left\{ \eta U_0 B \left(\frac{L}{h_1} \right)^2 \right\} \left\{ \frac{6}{K^2} \left(\log_e (K+1) - \frac{2K}{K+2} \right) \right\}$$

Η παροχή του ρευστού μέσω του εδράνου μπορεί να ευρεθεί σε $x_{\max}$ καθώς σ' αυτήν την περίπτωση η ροή δεν προκαλείται από διαφορά πίεσης, ως $Q = \left(\frac{U_0}{2} \right) B h_{\max} = (B h_1 U_0) \left(\frac{K+1}{K+2} \right)$.

Επίσης το κατώτερο μέρος του εδράνου ασκεί μια δύναμη διάτμησης εξ αιτίας της τάσης διάτμησης που κατανέμεται πάνω από την επιφάνεια του καθώς περνά από τη κεκλιμένη πλάκα και επειδή

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{U_0}{h} \quad \text{όταν } z=0$$

η ολική δύναμη διάτμησης δίδεται από

$$F = \int_{x_1}^{x_2} \tau B dx = \left(\frac{\eta U_0 B L}{h_1} \right) \left\{ \frac{4}{K} \log_e (K+1) - \frac{6}{K+2} \right\}.$$

Ο «συντελεστής τριβής» ενός εδράνου μερικές φορές καθορίζεται ως $\mu = F/W$.

Μεγάλου ενδιαφέροντος είναι η απαιτούμενη ισχύς για την κίνηση του ενός μέλους του εδράνου και δίδεται από το γινόμενο της δύναμης διάτμησης και της ταχύτητας ολίσθησης δηλαδή $P = F U_0$.

Πρέπει επίσης να εκτιμηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού καθώς περνά μέσα από το έδρανο. Η ισχύς που καταναλώνεται από το έδρανο εμφανίζεται ως θερμότητας που προκαλεί αύξηση στην θερμοκρασία του λαδιού. Με την υπόθεση πως όλη η ποσότητα του λαδιού που ρέει μέσω του εδράνου είναι εξίσου αποτελεσματική στην απορρόφηση της θερμότητας που παράγεται στο έδρανο και πως θερμότης δεν άγεται μέσω των μεταλλικών εξαρτημάτων του εδράνου, οπότε όλη η παραγόμενη θερμότης απορροφάται από το λάδι

$$P = F \cdot U_0 = Q \cdot e \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{όπου}$$

e = η πυκνότης του λαδιού, C_p = ειδική θερμότης ($\cong 1880 \text{ Nm/Kg. } ^\circ\text{C}$ για τα περισσότερα ορυκτέλαια) οπότε

$$\Delta T = P / QeC_p (^\circ\text{C})$$

Άσκηση:

Ένα έδρανο ώσεως πλάτους 200 mm και μήκους 50 mm λειτουργεί με ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης 0,1 mm και ταχύτητα ολίσθησης 3 m/s. Εάν το ιξώδες του λαδιού είναι 40 cP και ο λόγος της σφήνας ρυθμίζεται για να προσδώσει στο έδρανο την μέγιστη δυνατότητα φόρτισης υπολογίσατε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του εδράνου

h_2 / h_1	:	1,25	1,5	1,75	2,0	2,1889
$\overline{K}$		0,25	0,5	0,75	1,0	1,1889
$\overline{P}_m$		0,1333	0,2000	0,2338	0,2500	0,2555
$\overline{Q}$		0,5556	0,6000	0,6364	0,6667	0,6804
$\overline{W}$		0,0884	0,1312	0,1511	0,1589	0,1602
$\overline{F}$		0,9036	0,8437	0,8028	0,7726	0,7542

h_2 / h_1	:	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25
$\overline{K}$		1,25	1,5	1,75	2,0	2,25
$\overline{P}_m$		0,2564	0,2571	0,2545	0,2500	0,2443
$\overline{Q}$		0,6923	0,7143	0,7333	0,7500	0,7647
$\overline{W}$		0,1601	0,1577	0,1533	0,1479	0,1420
$\overline{F}$		0,7488	0,7292	0,7122	0,6972	0,6836

h_2 / h_1	:	3,5	3,75	4,0
$\overline{K}$		2,5	2,75	3,0
$\overline{P}_m$		0,2381	0,2316	0,2250
$\overline{Q}$		0,7778	0,7895	0,8000
$\overline{W}$		0,1360	0,1300	0,1242
$\overline{F}$		0,6711	0,6594	0,6494

Από τον πίνακα ανωτέρω προκύπτει πως όταν $K=1,1889$ τότε $h_2/h_1=K+1=2,1889$ και καθώς $h_1=0,1 \text{ mm}$ τότε $h_2=0,21889$ οπότε: η μέγιστη πίεση δίδεται:

$$P_m = \overline{P}_m \left(\frac{\eta U_0 L}{h_1^2} \right) = 0,2555 \left\{ \frac{0,04 \times 3 (50 \times 10^{-3})}{(0,1 \times 10^{-3})^2} \right\} = 153 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

Η παροχή:

$$Q = \overline{Q} (B h_1 U_0) = 0,6804 \left\{ (200 \times 10^{-3}) (0,1 \times 10^{-3})^3 \right\} = 2,471 / \text{min}$$

Δυνατότητα φόρτισης

$$W = \overline{W} (\eta U_0 B (L / h_1)^2) = 0,1602 \left\{ 0,04 \times 3 (200 \times 10^{-3}) \left(\frac{50 \times 10^{-3}}{0,1 \times 10^{-3}} \right) \right\} = 960 \text{ N} .$$

Δύναμη διάτμησης

$$F = \overline{F} \left(\frac{\eta U_0 B L}{h_1} \right) = 0,7542 \left\{ \frac{0,04 \times 3 (200 \times 10^{-3}) (50 \times 10^{-3})}{(0,1 \times 10^{-3})} \right\} = 9,05 \text{ N} .$$

$$\text{Ισχύς: } P = F U_0 = 9,05 \times 3 = 27,15 \text{ W}$$

$$\text{Συντελεστής τριβής: } \mu = F / W = 9,05 / 960 = 0,0094$$

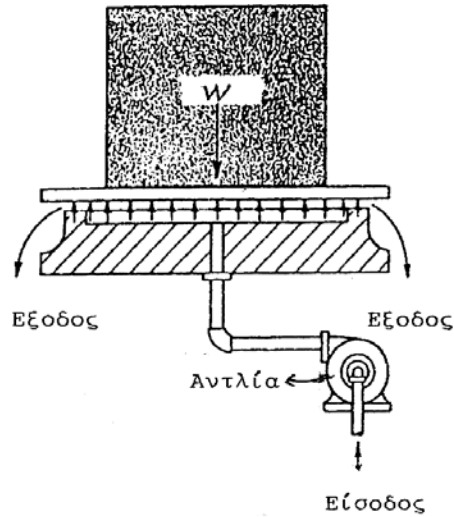
Αύξηση θερμοκρασίας λαδιού:

$$\Delta T = \frac{P}{Q p C_p} = \frac{27,5}{(41,184 \times 10^{-6}) (880) (1880)} = 0,4^\circ \text{C} .$$

6.3. ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΛΙΠΑΝΣΗ

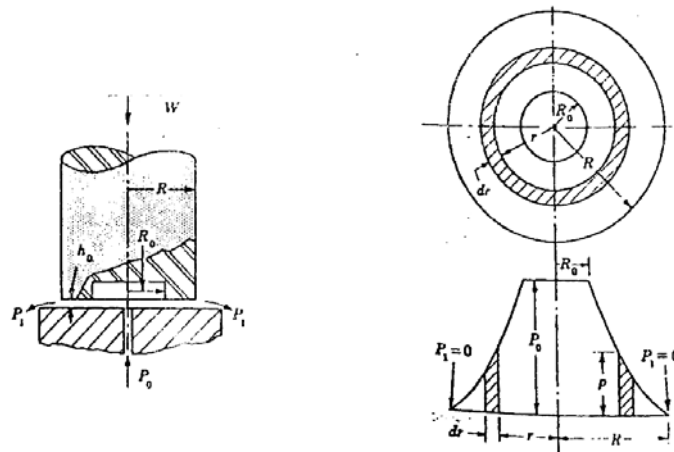
Στην υδροδυναμική λίπανση, όπως είδαμε, η πίεση που αναπτύσσεται στο λιπαντικό είναι ανάλογη της ταχύτητας. Όταν η ταχύτητα είναι μηδενική ή πολύ μικρή, τότε έχουμε πίεση μηδενική ή σχεδόν μηδενική.

Υπάρχουν κατασκευές (π.χ. τηλεσκόπια), όπου η σχετική ταχύτητα είναι πολύ μικρή και με την εφαρμογή υδροδυναμικής λίπανσης, το λιπαντικό δεν μπορεί να αναπτύξει πίεση που θα αντισταθμίσει τα φορτία της κατασκευής. Σε τέτοιες περιπτώσεις επιβάλλεται η εφαρμογή υδροστατικής λίπανσης, όπου με τη βοήθεια αντλίας τροφοδοτούμε το χώρο ανάμεσα στις λιπαινόμενες επιφάνειες, με λιπαντικό υπό πίεση (Σχ. 6.10).



Σχ. 6.10

Στο Σχ. 6.11 φαίνεται ένα υδροστατικό έδρανο και η κατανομή της πίεσης που αναπτύσσεται ανάμεσα στις λιπανόμενες επιφάνειες.



Σχ. 6.11

Η πίεση σε ακτίνα τ δίνεται από την εξίσωση:

$$p = \frac{6 \cdot \eta \cdot Q}{\pi \cdot h_0^3} \cdot \ln \frac{R}{\tau} \quad (6.3.1.)$$

όπου:

η : το δυναμικό ιξώδες σε teyns ($\text{lb} \cdot \text{sec} / \text{m}^2$)

Q : η παροχή του λιπαντικού σε m^3 / sec

h_0 : το πάχος του λιπαντικού στρώματος σε in

R : η ακτίνα του άξονα σε in

Η μέγιστη τιμή P_o δίνεται από την εξίσωση:

$$p_o = \frac{6 \cdot \eta \cdot Q}{\pi \cdot h_o^3} \cdot \ln \cdot \frac{R}{R_o} \quad (6.3.2.)$$

Η δύναμη W που αναπτύσσεται από την πίεση δίνεται από την εξίσωση:

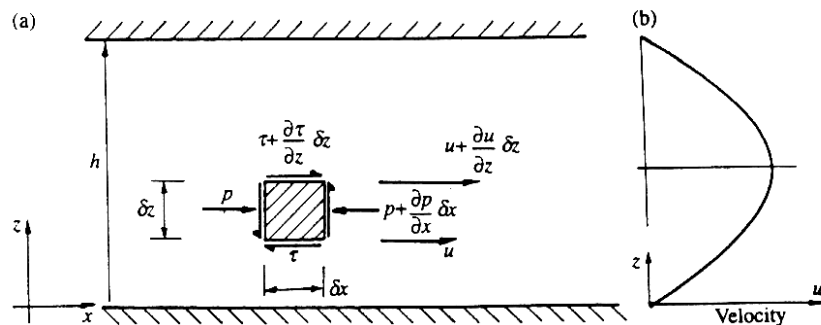
$$W = \frac{P_o \pi}{2} \left[\frac{R^2 - R_o^2}{\ln(R/R_o)} \right] \quad (6.3.3.)$$

Στην υδροστατική λίπανση έχουμε πάντα υγρή τριβή και έτσι η φθορά είναι ελάχιστη. Ενώ στην υδροδυναμική λίπανση στην έναρξη και στο τέλος της λειτουργίας έχουμε ημιυγρή τριβή με αποτέλεσμα αυξημένη φθορά.

Το κόστος της υδροστατικής λίπανσης σε σχέση με την υδροδυναμική είναι πολύ μεγάλο, γι' αυτό σε περιπτώσεις όπου μπορούμε να εφαρμόσουμε υδροδυναμική λίπανση την προτιμούμε.

Εφαρμογές Υδροστατικών Εδράνων.

Θεωρούμε την ροή μεταξύ δύο σταθερών παραλλήλων δίσκων που διαχωρίζονται από λιπαντική μεμβράνη πάχους h . Οι δίσκοι είναι απείρου μήκους κατά τον άξονα y , οπότε η ροή είναι παράλληλος κατά τον άξονα Ox και διατηρείται λόγω της πίεσης p στο αριστερό άκρο. Το διάκενο h είναι μικρό συγκρινόμενο με το μήκος του εδράνου κατά την διεύθυνση Ox και η ροή είναι στρωτή. Σε μικρά έδρανα υπάρχει μικρή δυσκολία στο να ικανοποιηθεί η ανωτέρω απαίτηση, όμως σε πολύ μεγάλα υδροστατικά έδρανα που συνδιάζουν τόσο υδροδυναμική όσο και υδροστατική σχεδίαση μπορεί να υπάρχει σημαντική επίδραση λόγω στροβιλισμού εντός της μεμβράνης. Θεωρώντας την ισορροπία του στοιχείου ρευστού βάθους 1 μονάδας κάθετα στο επίπεδο Oxz βλ. Σχ. 6.12 κατωτέρω, μπορούμε να γράψουμε:



Σχ. 6.12

$$\frac{\partial p}{\partial x} \delta x \delta z = \frac{\partial \tau}{\partial z} \delta z \delta x \quad \text{ή} \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

Λόγω Νευτώνειου υγρού $\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial z}$ (οι αδρανειακές δυνάμεις και οι δυνάμεις βαρύτητας αγνοούνται)

U είναι η ταχύτητα κατά τον άξονα Ox οπότε από τις ανωτέρω εξισώσεις λαμβάνουμε

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Υποθέτοντας πως η είναι ανεξάρτητο του z , δηλαδή την θέση του στοιχείου στην λιπαντική μεμβράνη, λαμβάνουμε

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Εάν η διάσταση x του εδράνου είναι πολύ μεγαλύτερη από το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης μπορούμε να πάρουμε την πίεση να μην εξαρτάται με το z , οπότε p είναι μόνο συνάρτηση του x οπότε

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Ολοκληρώνοντας δύο φορές λαμβάνουμε

$$\eta u = \frac{dp}{dx} \frac{z^2}{2} + Az + B$$

A και B σταθερές.

Όταν $z=0$ και $z=h$ τότε $u=0$ οπότε

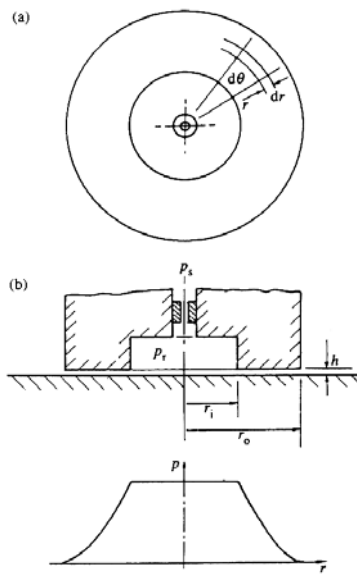
$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} z(z-h)$$

δηλαδή οι ταχύτητες κατά πλάτος του διακένου κατανέμονται παραβολικά.

Η παροχή q ανά μονάδα πλάτους του εδράνου θεωρώντας το ρευστό ασυμπίεστο παριστάνεται από την επιφάνεια κάτω από την κατανομή της ταχύτητας:

$$q = \int_0^h u dz = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx}$$

Εάν θεωρήσουμε έναν κυκλικό δίσκο όπως φαίνεται στο Σχ. 6.13



Σχ. 6.13

α) Γεωμετρία, β) κατανομή πίεσης εντός κυκλικού υδροστατικού εδράνου.

Το έδρανο έχει μια εξωτερική ακτίνα r_0 . Ενώ το κεντρικό άνοιγμα έχει ακτίνα r_i . Σε κάποια ενδιάμεση ακτίνα δηλ. $r_i < r < r_0$, η παροχή γίνεται:

$$Q = \frac{-h^3}{12\eta} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot 2\pi r$$

όπου Q είναι η ολική παροχή μέσω του εδράνου, οπότε με ολοκλήρωση λαμβάνουμε

$$\frac{\pi h^3}{6\eta} \int_{p_r}^0 dp = -Q \int_{r_i}^{r_0} \frac{dr}{r}$$

$$\text{οπότε } Q = \frac{\pi h^3 p_r}{6\eta \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}$$

Όπου p_r είναι η πίεση του ρευστού στον κεντρικό θύλακα εάν δε p είναι η πίεση σε κάποια ενδιάμεση ακτίνα

$$\frac{\pi h^3}{6\eta} \int_{p_r}^p dp = -Q \int_{r_i}^r \frac{dr}{r}$$

$$Q = \frac{\pi h^3 (p_r - p)}{6\eta \ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}$$

$$\text{Οπότε } Q = \frac{\pi h^3 p_r}{6\eta \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)} = \frac{\pi h^3 (p_r - p)}{6\eta \ln\left(\frac{r}{r_i}\right)} \quad \text{ή} \quad \frac{p}{p_r} = \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r}\right)}{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}$$

Το ολικό φορτίο W που μπορεί να σηκώσει το έδρανο δίνεται από το ολοκλήρωμα

$$W = \int_0^{r_0} p \cdot 2\pi r dr$$

$$\text{ή } W = \left[p \pi r^2 \right]_0^{r_0} - \int_0^{r_0} \pi r^2 \frac{dp}{dr} dr$$

Σε ακτίνα r_0 , $p = 0$

$$W = - \int_0^{r_0} \pi r^2 \frac{dp}{dr} dr$$

Στον κεντρικό θύλακα από $r=0$ μέχρι $r=r_i$ η πίεση του ρευστού είναι σταθερή σε p_r και έτσι $\frac{dp}{dr}=0$ οπότε το κάτω όριο του ολοκληρώματος μπορεί να μετατοπισθεί σε r_i δηλαδή $W = -\int_{r_i}^{r_0} \pi r^2 \frac{dp}{dr} dr$

$$\text{Αλλά } Q = \frac{-h^3}{12\eta} \frac{dp}{dr} 2\pi r \quad \text{ή} \quad \frac{dp}{dr} = \frac{-12\eta Q}{2\pi h^3}$$

$$\text{Οπότε } W = -\int_{r_i}^{r_0} \pi r^2 \left(\frac{12\eta Q}{2\pi h^3} \right) dr = \frac{6\eta Q}{h^3} \int_{r_i}^{r_0} r dr = \frac{3\eta Q}{h^3} (r_0^2 - r_i^2) = \frac{\pi r_0^2 p_r \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^2 \right)}{2 \ln(r_0/r_i)}$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει πως το φορτίο δεν είναι συνάρτηση του ιξώδους, συνεπώς οποιοδήποτε ρευστό που δεν προσβάλλει το υλικό των εδράνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Όταν κάποιο ρευστό χρησιμοποιείται και για άλλο σκοπό σε κάποιο μηχανισμό χρησιμεύει ταυτόχρονα και ως λιπαντικό όπως π.χ. κηροζίνη σε μηχανές αεροσκαφών, νερό σε υδραυλικούς μηχανισμούς ή υγρό οξυγόνο σε πυραύλους.

Η απαιτούμενη πίεση ανύψωσης δίδεται από τη σχέση $P_{ανψ.} \cdot \pi r_i^2 = W$

$$\text{Από την σχέση } Q = \frac{\pi h^3 p_r}{6\eta \ln(r_0/r_i)} \text{ παρατηρούμε πως } p_r \text{ είναι ανάλογος του } Q/h^3 \text{ και από την σχέση } W = \frac{\pi r_0^2 p_r \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^2 \right)}{2 \ln(r_0/r_i)} \text{ παρατηρούμε πως το φορτίο}$$

είναι ανάλογο του του p_r άρα η παροχή Q είναι ανάλογος του Wh^3 δηλαδή για σταθερή παροχή το φορτίο W αυξάνεται καθώς μειώνεται το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης. Αυτό σημαίνει πως ένα έδρανο όπου η παροχή είναι σταθερή, είναι αυτορυθμιζόμενο. Το οριακό πρακτικό φορτίο επιτυγχάνεται όταν το h μειώνεται στο επίπεδο της τραχύτητας της επιφάνειας.

Με την υπόθεση πως η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας του λιπαντικού μεταβάλλεται γραμμικά δια μέσου της μεμβράνης και πως η τριβή λόγω ιξώδους εντός του θύλακος θεωρείται αμελητέα τότε η δύναμη διάτμησης στο στοιχείο του ρευστού δίδεται:

$$f = \eta A \frac{u}{h} = \eta (r d\theta dr) \frac{\omega r}{h} = \frac{\eta \omega r^2 dr d\theta}{h} \quad \text{οπότε}$$

η τριβική ροπή δίδεται

$$t_q = \frac{\eta \omega}{h} \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_0} r^3 dr d\theta = \frac{\pi \eta \omega}{2h} (r_0^4 - r_i^4)$$

Δίδεται ένα έδρανο ώσης που λυπαίνεται υδροστατικά ως το Σχ. 6.14 και οι ακόλουθοι τιμές $r_0=7,5$ cm, $r_i=5,0$ cm, $W=50$ KN (φορτίο) $N_a=15$ rev/s, $n=2,4 \times 10^{-2}$ N.s/m².

Εάν το επιθυμητό πάχος της λιπαντικής μεμβράνης είναι 100 μm , υπολογίσατε την πίεση στο διάκενο, την παροχή και την απώλεια ισχύος γι' αυτό το έδρανο.

$$W = \pi p_r (r_0^2 - r_1^2) / 2 \ln(r_0/r_1) \text{ άρα}$$

$$P_r = 2W \cdot \ln(r_0/r_1) / \pi(r_0^2 - r_1^2) =$$

$$= \frac{2 \times 50 \times 10^3 \ln(7,5/5)}{\pi \times 10^{-4} [7,5^2 - 5^2]} = 0,413 \times 10^7 \text{ N/m}^2 = 4,13 \text{ MPa}$$

$$\text{Παροχή } Q = \frac{\pi h^3 p_r}{6\eta \ln(r_0/r_1)} = \frac{\pi (100 \times 10^{-6})^3 (4,13 \times 10^6)}{6 \times 2,4 \times 10^{-2} \ln(7,5/5)} = 0,0133 \text{ m}^3/\text{min} = 0,8 \text{ m}^3/h$$

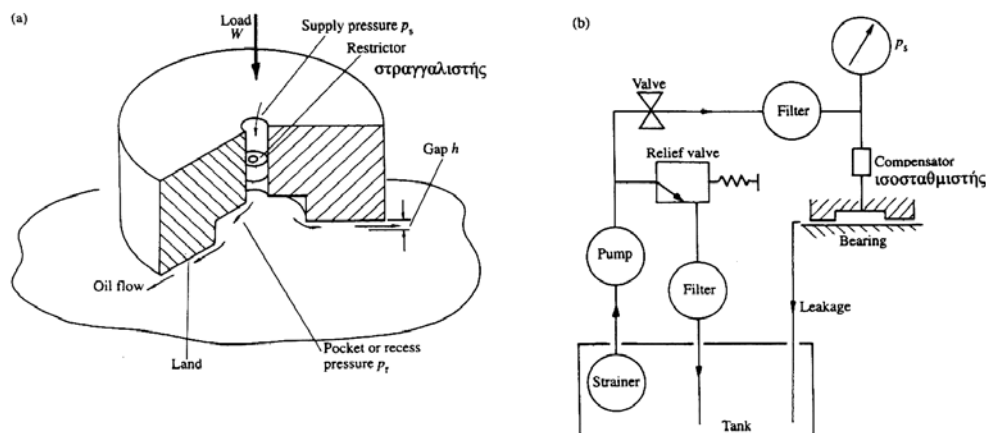
$$\text{Ολική απώλεια ισχύος } = H_t = H_r + H_p =$$

απώλεια λόγω ιξώδους + απώλεια άντλησης =

$$= \frac{\pi \eta \omega^2 (r_0^4 - r_1^4)}{2h} + \frac{\pi h^3 p_r^2}{6\eta \ln(r_0/r_1)} = \frac{\pi (2,4 \times 10^{-2})}{2(100 \times 10^{-6})} [15 \times 2\pi]^2 (10^{-4}) (10^{-4}) [7,5^4 - 5^4] +$$

$$\pi (100 \times 10^{-6})^3 (0,413 \times 10^7)^2 / 6(2,4 \times 10^{-2}) \ln(7,5/5) = 0,085 + 0,92 = 1,005 \text{ KW}$$

Δηλαδή $H_t = H_p$ και $H_p \gg H_r$.



α) Υδροστατικό έδρανο

β) Σύστημα παροχής

Σχ. 6.14

Σύγκριση Υδροδυναμικών – Υδροστατικών Εδράνων.

Υδροδυναμικά έδρανα έχουν μικρή τιμή δύναμης τριβής οπότε μικρή απώλεια ισχύος, έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα πως είναι απλά και συνεπώς αξιόπιστα, φθηνά και δεν απαιτούν ειδική επίβλεψη. Πάραυτα έχουν και κάποια μειονεκτήματα.

1. Εάν η ταχύτητα σχεδιασμού είναι χαμηλή δεν θα έχουμε ανάπτυξη επαρκούς πίεσης.
2. Η λιπαντική ιδιότητα μπορεί να καταστραφεί κατά την εκκίνηση, αλλαγή κατεύθυνσης και σταμάτημα.
3. Η πίεση του εδράνου μεταβάλλεται με το φορτίο γεγονός που συντελεί σε μικρή ακαμψία.

Στα υδροστατικά ή «εξωτερικά δεχόμενα πίεση» δεν έχουμε μειονεκτήματα 1 και 2 και μετριάζεται το τρίτο. Τα χαρακτηριστικά των υδροστατικών εδράνων είναι:

1. Εξαιρετικά χαμηλή τριβή.
2. Εξαιρετικά υψηλή δυνατότητα φόρτισης σε χαμηλές ταχύτητες.
3. Υψηλή ακρίβεια επίτευξης κάποιας θέσης σε υψηλές ταχύτητες μικρά φορτία.
4. Πολύπλοκο σύστημα λίπανσης.

Τα υδροστατικά έδρανα χρησιμοποιούνται όπου οι απαιτήσεις είναι υψηλές όπως σε μεγάλα τηλεσκόπια, συστήματα radar όπου απαιτούνται ιδιαίτερα μεγάλα φορτία και χαμηλές ταχύτητες, επίσης στις εργαλειομηχανές, και στα γυροσκόπια όπου απαιτούνται πολύ υψηλές ταχύτητες, μικρά φορτία και αέρια λιπαντικά.

6.4. ΟΡΙΑΚΗ ΛΙΠΑΝΣΗ

Σε ένα υδροδυναμικό έδρανο κατά την έναρξη και το τέλος της λειτουργίας, οι τιμές της ταχύτητας αρχίζουν από μια μηδενική και φτάνουν σε μια μηδενική τιμή. Έτσι δεν έχουμε ανάπτυξη πίεσης στο λιπαντικό, ικανής να αντισταθμίσει τα φορτία που δέχεται το έδρανο. Ένα μέρος του φορτίου αντισταθμίζεται από το λιπαντικό και ένα μέρος από την επαφή των στερεών επιφανειών έχουμε δηλαδή ημιυγρή τριβή.

Το παχύ λιπαντικό στρώμα δεν μπορεί να διατηρηθεί και έχουμε μόνο μια λεπτή λιπαντική μεμβράνη πάχους μερικών μορίων. Τις συνθήκες αυτές λίπανσης ονομάζουμε οριακή λίπανση.

Ο συντελεστής τριβής στην οριακή λίπανση είναι αρκετά μεγάλος (0,05-0,15) όπως επίσης και η φθορά είναι σημαντική.

Η τριβή στην οριακή λίπανση είναι ανεξάρτητη του ιξώδους του λιπαντικού και της ταχύτητας των επιφανειών και εξαρτάται από το φορτίο και την λιπαρότητα του λιπαντικού.

Λιπαρότητα ονομάζουμε την ικανότητα μερικών μορίων να κολλάνε στις μεταλλικές επιφάνειες προσανατολιζόμενα κάθετα σε αυτές. Τα μόρια που

έχουν τέτοιες ικανότητες, ονομάζονται πολικά μόρια. Τα ορυκτέλαια περιέχουν ελάχιστα πολικά μόρια και γι' αυτό δεν είναι κατάλληλα λιπαντικά κατά την οριακή λίπανση. Για να βελτιώσουμε την συμπεριφορά των ορυκτέλαιων στην οριακή λίπανση προσθέτουμε λιπαρά λάδια.

6.5. ΕΛΑΣΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΛΙΠΑΝΣΗ

Στην πράξη συναντάμε περιπτώσεις (π.χ. λίπανση οδοντοτών τροχών), όπου ενώ δεν μπορεί να έχουμε υδροδυναμική λίπανση, η φθορά των υλικών είναι τόσο μικρή σαν είχαμε υδροδυναμική λίπανση. Η μελέτη τέτοιων φαινομένων είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της θεωρίας της ελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης.

Κατά την ερμηνεία των φαινομένων της υδροδυναμικής λίπανσης θεωρήσαμε ότι δεν έχουμε παραμόρφωση των επιφανειών και ότι το ιξώδες είναι ανεξάρτητο από την πίεση που αναπτύσσεται. Η θεωρία της ελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης θεωρεί, ότι έχουμε ελαστική παραμόρφωση των επιφανειών και ότι το ιξώδες μεταβάλλεται με την πίεση.

Με την αύξηση του ιξώδους, αυξανόμενης της πίεσης, έχουμε αύξηση του πάχους του λιπαντικού στρώματος. Επίσης η ελαστική παραμόρφωση των επιφανειών έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του λιπαντικού στρώματος.

Ο συνδιασμός των δύο μας δίνει σαν αποτέλεσμα, την ελάττωση σε μεγάλο βαθμό της φθοράς και την αύξηση της ικανότητας φόρτισης του λιπαντικού στρώματος.

Για παράδειγμα αναφέρουμε την δυνατότητα φόρτισης δίσκων που είναι σε επαφή, σε ειδική μηχανή. Το πάχος του λιπαντικού στρώματος είναι χιλιοστό της ίντσας.

- Σύμφωνα με την θεωρία της υδροδυναμικής λίπανσης η δυνατότητα φόρτισης είναι $0,6 \text{ tn/in}^2$.
- Υπολογιζόμενης μόνο της μεταβολής του ιξώδους με την πίεση, έχουμε ικανότητα φόρτισης $1,3 \text{ tn/in}^2$.
- Υπολογιζόμενης μόνο της ελαστικής παραμόρφωσης, η ικανότητα φόρτισης είναι $2,4 \text{ tn/in}^2$.
- Σύμφωνα με την ελαστοϋδροδυναμική θεωρία η ικανότητα φόρτισης είναι 23 tn/in^2 .

Από το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται η τεράστια σημασία της ελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 1. «Τεχνολογία Λιπαντικών» Γ.Β. Κυριακόπουλου 1980.
2. 2. «Μηχανουργικές Κατεργασίες με απλ. ευθείας Παραμόρφωση» Β.Σ. Φλωράκη 1978.
3. 3. «Γράσσα» MOBIL 1984.
4. 4. «Tribology» Horse Czichos 1978.
5. 5. «Friction and Wear» A.D. Sarkar 1980.
6. 6. «Theory and Practice of Lubrication for Engineers» Dudley D. Fuller 1982.
7. 7. «The Principles of Lubrication» A. Cameron 1966.
8. 8. «Metal Forming» Machillan 1970.
9. 9. «Fluid Mechanics» Plint – Bosworth 1980.
10. 10. «Some economic factors of Tribology» P. Jost 1976.
11. 11. «Tribology Principles and Design Applications» R.D. Arnell, P.B. Davies, J. Halling and T.L. Whomes, Ed: Macmillan, 1991.
12. 12. «Engineering Tribology» J.A. Williams, Ed: Oxford Science Publications, 1994.
13. 13. «Tribology. Friction and Wear at Engineering Materials» I.M. Hutchings, Ed: Edward Arnold, 1992.
14. 14. «Μεταλλουργία» Π.Γ. Πετρόπουλου, Εκδ.: Ίδρυμα Ευγενίδη, 1997.
15. 15. «Λιπαντικά και Λίπανση Μηχανολογικού εξοπλισμού» Χ. Αποστολίδη, Στ. Περδίου, Εκδ.: Φοίβος.
16. 16. «Fundamentals of fluid film Lubrication B.J. Hamrock, Ed: Mc Graw Hill, 1994.
17. 17. «Materials and Processes in Manufacturing» E.P. De Garmo, J.T. Black, R.A. Kohser, Ed: Collier Macmillan Publishers, 1998.
18. 18. «Workshop Technology» W.A.J. Chapman, Ed: Arnold, 1978.