

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΜΗΧΑΝΩΝ –
ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΧΑΤΖΗΣΑΒΒΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΑΑΝΤ ΦΑΝΤΙ**

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2012

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΜΗΧΑΝΩΝ –
ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΧΑΤΖΗΣΑΒΒΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΜ: 4156

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ:

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Ακαδημίας του Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας στην σχολή μηχανικών, κατά την περίοδο Ιανουάριος 2011 - Μάιος 2012. Βασικός της σκοπός είναι η ενημέρωση του αναγνώστη γύρω από τους υπερπληρωτές γενικότερα, και ειδικότερα για τους turbochargers.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στην υπερπλήρωση και στις κατηγορίες της, στη μηχανική υπερπλήρωση (Supercharging), και στην στροβιλοϋπερπλήρωση (Turbocharging). Στη συνέχεια ορίζονται οι περιπτώσεις εφαρμογής της υπερπλήρωσης καθώς και οι μέθοδοι υπερπλήρωσης των τετράχρονων και δίχρονων μηχανών.

Το 2^ο κεφάλαιο εστιάζει στους turbochargers, κάνοντας μια θεωρητική προσέγγιση και μια ιστορική αναδρομή από τον πρώτο υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα το 1910, μέχρι σήμερα. Ακολουθεί κατηγοριοποίηση των turbochargers βάσει του μεγέθους τους σε μικρούς, μεσαίους και μεγάλους στροβιλοϋπερπληρωτές, καθώς και γίνεται ανάλυση όλων των εξαρτημάτων που τον συνθέτουν και του τρόπου που το καθένα λειτουργεί.

ABSTRACT

This thesis was produced as part of the undergraduate curriculum of the Academy of Merchant Navy of Macedonia in engineering school during the period January 2011 - May 2012. Its basic aim is the briefing of the reader around charging in general, and more specifically for the turbocharging.

Initially, a brief introduction is made to charging and its categories, supercharging and turbocharging. Later, we specify the applications of charging and the supercharging methods of four-stroke and two-stroke engines.

The second chapter focuses on turbochargers. It makes a theoretical approach and a historical overview from the first turbocharged engine in 1910, until nowadays. It follows a categorization of turbocharger, based in its size, in small, medium and large turbochargers, as well as an analysis of all the components it is composed and how each one works.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η υπερπλήρωση είναι η εισαγωγή συμπιεσμένου αέρα στους κυλίνδρους του κινητήρα και έχει σκοπό την αύξηση της ισχύος του. Για έναν κινητήρα με δεδομένο κυβισμό και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του, η υπερπλήρωση είναι ο μόνος τρόπος αύξησης ισχύος, εφόσον ούτε ο αριθμός στροφών ούτε η σχέση συμπίεσης μπορούν να αυξηθούν πάνω από κάποιο όριο. Εισάγοντας συμπιεσμένο αέρα στον κύλινδρο, επιτυγχάνεται η είσοδος μεγαλύτερης μάζας αέρα στον συγκεκριμένο όγκο. Επομένως η καύση γίνεται πολύ πιο αποτελεσματική, αυξάνοντας σημαντικά τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ του κινητήρα και τη μέγιστη ροπή του. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την υπερπλήρωση είναι:

1. ο στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίου και
2. οι μηχανικοί συμπιεστές.

Η τεχνολογία της στροβιλοσυμπίεσης θεωρείται σήμερα ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος που συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση του CO₂ σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η σχεδίαση του υπερσυμπιεστή είναι μια σημαντική πρόκληση για τη βελτίωση της απόδοσης του υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα. Πρέπει να βασισθεί στις πληροφορίες των συνθηκών λειτουργίας του κινητήρα και να αναπτυχθεί μια σύνδεση κατάλληλη, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κινητήρα και τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού, ώστε να δημιουργηθούν οι πλέον κατάλληλες προδιαγραφές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ

1.1 Γενικά

Οι επιλογές για την αύξηση της παροχής αέρα είναι η πρόψυξη του αέρα για να αυξηθεί η πυκνότητά του ή η χρήση της υπερπλήρωσης. Υπερπλήρωση ονομάζεται η αυξημένη ποσότητα του αέρα εισαγωγής στον κύλινδρο μίας μηχανής σε σχέση με την ποσότητα του αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο με απλή σάρωση ή αναρρόφηση. Ο αέρας της υπερπλήρωσης έχει πάντα πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική και φτάνει μέχρι τα $4,5 \text{ kg/cm}^2$. Προκειμένου να αυξηθεί η ισχύς μιας μηχανής χρειάζεται να καεί μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου και για να γίνει αυτό χρειάζεται και μεγαλύτερη ποσότητα αέρα. Ο λόγος αυτός οδήγησε στην εφαρμογή της υπερπλήρωσης. Ο βασικός τύπος υπολογισμού της ισχύος μίας μηχανής είναι:

$$N_i = \frac{P_i * A * L * n * Z}{4500} , \text{ για δίχρονα μηχανές}$$

$$N_i = \frac{P_i * A * L * n * Z}{9000} , \text{ για τετράχρονα μηχανές}$$

Όπου: N_i = Ενδεικτική ισχύς

P_i = Μέση ενδεικτική πίεση

A = Επιφάνεια εμβόλου

L = Διαδρομή εμβόλου

n = Αριθμός στροφών

Z = Αριθμός κυλίνδρων

Ο παραπάνω τύπος υποδεικνύει ότι αν αυξηθεί ένας από τους παράγοντες του αριθμητή τότε θα αυξηθεί και η ισχύς της μηχανής. Αναλυτικότερα, αν αυξηθεί η επιφάνεια του

εμβόλου ή ο αριθμός των κυλίνδρων, θα μεγαλώσουν ο όγκος, το βάρος και το κόστος της μηχανής. Με την αύξηση της διαδρομής του εμβόλου θα αυξηθεί ο όγκος, το βάρος και οι τριβές. Τέλος, αν αυξηθούν οι στροφές της μηχανής, τότε θα αυξηθούν οι τριβές αλλά η αύξηση των στροφών της προπέλας δεν θα συμφωνούν με αυτές της μηχανής.

Προκειμένου να υπάρχει ο μικρότερος δυνατός όγκος, βάρος και κόστος της μηχανής με παράλληλη αύξηση της ισχύος της πρέπει να αυξηθεί η μέση ενδεικτική ισχύς. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να καεί περισσότερη ποσότητα καυσίμου. Ωστόσο, η καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου απαιτεί και μεγαλύτερη ποσότητα αέρα. Μ' αυτή την αναγκαιότητα επικράτησε η υπερπλήρωση.

Η υπερπλήρωση αυξάνει την διαθέσιμη ισχύ για τον ίδιο τον ατμοσφαιρικό κινητήρα καθώς και την πυκνότητα του αέρα, αυξάνοντας την πίεση στην οποία ο κύλινδρος είναι γεμάτος με αέρα κατά τη διάρκεια της λήψης αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος του κινητήρα για το ίδιο μέγεθος κυλίνδρου. [8]

1.2 Κατηγορίες Υπερπλήρωσης

Ο συμπιεστής σε μια μονάδα υπερπλήρωσης μπορεί να πάρει κίνηση με δύο τρόπους, οι οποίοι καθορίζουν και τις δύο μεθόδους ή κατηγορίες υπερπλήρωσης. Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται μηχανική υπερπλήρωση (Supercharging), ενώ η δεύτερη στροβιλοϋπερπλήρωση (Turbocharging). Και οι δυο μέθοδοι μαζί καλούνται συστήματα βεβιασμένης προσαγωγής αέρα (forced induction system). Στην πρώτη μέθοδο, η περιστροφική ταχύτητα της μηχανής καθορίζει το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή, ενώ στη δεύτερη το σημείο λειτουργίας του στροβίλου καθορίζει το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή.

Τόσο η μηχανική υπερπλήρωση, όσο και η στροβιλοϋπερπλήρωση ωθούν τον αέρα στον κινητήρα με υψηλότερη πίεση από την κανονική. Το οξυγόνο του αέρα επιτρέπει την καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, και συνεπώς την παραγωγή περισσότερης ενέργειας και δύναμης. Η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δυο κατηγοριών αφορά την τροφοδοσία τους.

Στην περίπτωση της μηχανικής υπερπλήρωσης ο αέρας ωθείται στον κινητήρα για να αυξηθεί το ποσό του αερίου που καίγεται σε κάθε κινητήρα. Με την καύση περισσότερων καυσίμων, απελευθερώνεται περισσότερη ενέργεια και παράγεται

περισσότερη δύναμη από τον κινητήρα. Ο μηχανικός υπερπληρωτής είναι τοποθετημένος στον κινητήρα και τροφοδοτείται άμεσα από τον στρόφαλο του κινητήρα.



Εικόνα 1.1. Supercharger

Οι στροβιλοϋπερπληρωτές είναι παρόμοιοι με τους μηχανικούς υπερπληρωτές. Ο αέρας ωθείται επίσης στον κινητήρα με σκοπό την αύξηση της ισχύος λόγω του περισσότερου αέρα στον κινητήρα. Ωστόσο, μολονότι οι στροβιλοϋπερπληρωτές είναι τοποθετημένοι στον κινητήρα, χρησιμοποιούν τα καυσαέρια από τον κινητήρα για να ενεργοποιήσουν τον ανεμιστήρα που βγάζει περισσότερο αέρα στον κινητήρα.



Εικόνα 1.2. Turbocharger

Λόγω του ότι οι μηχανικοί υπερπληρωτές είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το στρόφαλο του κινητήρα, εκχέουν δύναμη από τον κινητήρα που θα μπορούσαν να είχαν περάσει στους κινητήριους τροχούς. Για παράδειγμα, ένας υπερσυμπιεστής σε μια Rolls Royce Merlin χρησιμοποιεί περίπου 150 ίππους από τον κινητήρα. Ωστόσο, ο υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας παράγει 1.000 ίππους. Η μηχανή από μόνη της παράγει 750 ίππους, διαμορφώνοντας έτσι το καθαρό κέρδος σε δύναμη στους 250 ίππους.

Ένας στροβιλοϋπερπληρωτής χρησιμοποιεί καυσαέρια από τον κινητήρα για να κινήσει τον ανεμιστήρα του. Παρά το γεγονός ότι συχνά ωθείται μικρότερη ισχύ από τους μηχανικούς υπερπληρωτές, δεν τοποθετείται ένα επιπλέον φορτίο στον κινητήρα και δεν απαιτείται η καύση πρόσθετου καυσίμου για την τροφοδοσία του. Οι στροβιλοϋπερπληρωτές χρησιμοποιούν λιγότερα καύσιμα από ό, τι οι μηχανικοί υπερπληρωτές.

Στα υπερτροφοδοτούμενα αυτοκίνητα, η ώθηση συνδέεται άμεσα με τον κινητήρα και είναι σχεδόν άμεση. Στα στροβιλοϋπερπληρωμένα υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση επειδή τροφοδοτούνται από την εξάτμιση, το οποίο συμβαίνει αφού ο κινητήρας έχει φτάσει την επιθυμητή RPM. Η απαγωγή της θερμότητας είναι ένα πιθανό πρόβλημα στους υπερσυμπιεστές, επειδή κινούνται με αέρια εξάτμισης. Εξαιτίας αυτού, οι υπερπληρωτές γενικά θεωρούνται πιο αξιόπιστοι, αν και η ψύξη στους υπερσυμπιεστές είναι πολύ καλή. [9]

Το κύριο πλεονέκτημα του στροβιλοϋπερπληρωτή σε σχέση με τον μηχανικό υπερπληρωτή είναι ότι η ενέργεια εισόδου προέρχεται από τα καυσαέρια, η ενέργεια των οποίων διαφορετικά θα παρέμενε αχρησιμοποίητη. Έτσι, η χρήση στροβιλοϋπερπληρώσεως αυξάνει το βαθμό απόδοσης της μηχανής. Όμως, η υλοποίηση και ο σχεδιασμός του συγκροτήματος υπερπληρώσεως είναι μια δυσκολότερη διαδικασία, ενώ απαιτείται υψηλή απόδοση από όλα τα τμήματα που απαρτίζουν την μονάδα του στροβιλοϋπερπληρωτή.

1.3 Εφαρμογές Υπερπλήρωσης

Προκειμένου να γίνει εφαρμογή της υπερπλήρωσης πρέπει οι μηχανές να είναι κατασκευασμένες με υψηλής αντοχής υλικά λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών

τάσεων και των μεγάλων πιέσεων καύσης. Η ψύξη και η λίπανση της μηχανής θα πρέπει να είναι κατά πολύ βελτιωμένες. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η μηχανή θα έχει ανθεκτικότητα απέναντι στην αύξηση της ισχύος με αντοχή στις μεγάλες τάσεις πιέσεων και θερμοκρασίας.

Η υπερπλήρωση θα πρέπει να εφαρμόζεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- σε μηχανές αεροπλάνων, όπου είναι αναγκαίος ο μικρός όγκος και βάρος της μηχανής,
- σε μηχανές πλοίων, όπου οι ανάγκες για μεγάλες ιπποδυνάμεις επιβάλλουν μηχανές με υπερπλήρωση,
- σε μηχανές εγκατεστημένες σε μεγάλο υψόμετρο, όπου η ατμόσφαιρα είναι αραιή,
- στις 4χρονης μηχανές λόγω του ότι με την δημιουργία κενού κατά την φάση της εισαγωγής μπαίνει μειωμένη ποσότητα αέρα στον κύλινδρο,
- στις 2χρονης αργόστροφες μηχανές για μείωση του όγκου του βάρους, και συνεπώς των διαστάσεων της μηχανής,
- σε όλους τους τύπους των μηχανών εσωτερικής καύσης για την αύξηση της ισχύος και της απόδοσής τους.

1.4 Μέθοδοι Υπερπλήρωσης

Υπερσυμπίεση σταθερής πίεσης.

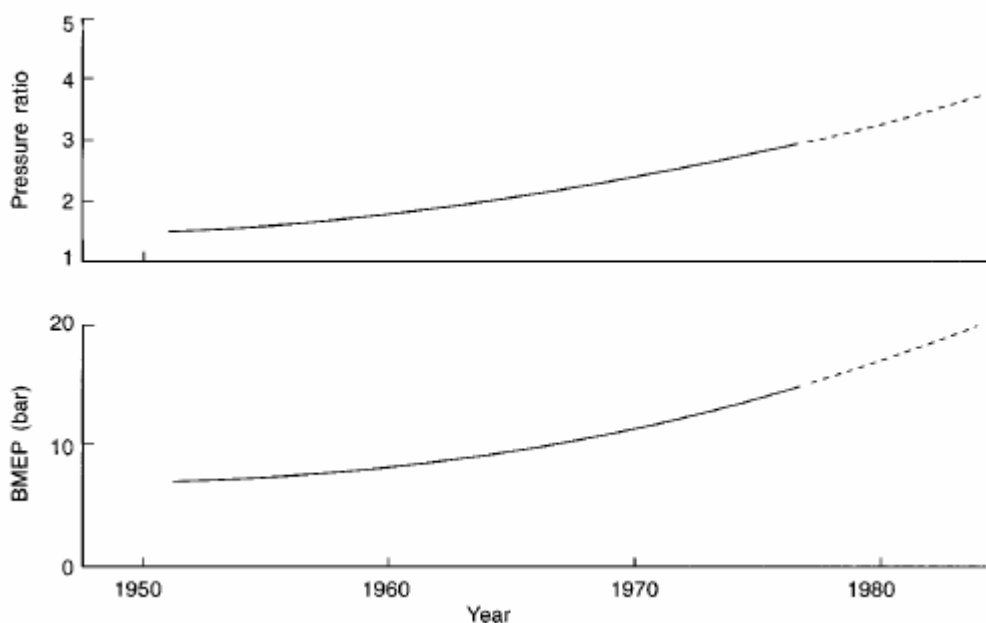
Οι διάφοροι κύλινδροι εκχέουν τα καυσαέρια τους σε ένα κοινό συλλέκτη σε υψηλότερες πιέσεις από την ατμοσφαιρική. Τα καυσαέρια όλων των κυλίνδρων διαστέλλονται στις βαλβίδες εξαγωγής σε μια σχεδόν σταθερή πίεση στον κοινό συλλέκτη και στη συνέχεια εισάγονται στον στρόβιλο. Έτσι, η ενέργεια που εκτονώνεται με τη μορφή της εσωτερικής ενέργειας μετατρέπεται σε έργο στην τουρμπίνα. Όσο υψηλότερη είναι η αναλογία πίεσης της τουρμπίνας, τόσο υψηλότερη είναι η ανάκτηση της εκτονωμένης ενέργειας. Σε όλη τη διάρκεια του κύκλου, τα καυσαέρια διατηρούνται σε σταθερή πίεση προκειμένου να εξασφαλιστεί μια καθαρή αντίδραση της τουρμπίνας.

Παλμική υπερσυμπίεση

Σε αυτή τη μέθοδο της υπερσυμπίεσης, την στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα καυσαερίων, ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που εγχέεται μετατρέπεται σε καυσαέρια. Αυτοί οι παλμοί εισάγονται στην τουρμπίνα, μέσω στενών σωλήνων εξάτμισης από μια όσο το δυνατόν συντομότερη διαδρομή, όπου ανακτάται ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας. Προκειμένου η διαδικασία εξαγωγής των διαφόρων κυλίνδρων να μην έρχεται σε αντίθεση με κάποια άλλη, χρησιμοποιούνται ξεχωριστοί σωλήνες εξάτμισης.

Παλμικός μετατροπέας

Αυτή η μέθοδος υπερσυμπίεσης προσφέρει ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα της παλμικής και σταθερής πίεσης μεθόδου υπερπλήρωσης. Ο συνδυασμός αυτών των δύο συστημάτων γίνεται με την ταυτόχρονη σύνδεση των διαφόρων τομέων των πολλαπλών καυσαερίων σε ειδικά διαμορφωμένη σύνδεση, τον "παλμικό μετατροπέα", πριν από τον στρόβιλο.



Εικόνα 1.3. Αύξηση bme_p σε δίχρονους κινητήρες ντίζελ και λόγος πίεσης συμπίεσής.

Υπερσυμπιεστής δύο σταδίων

Η υπερπλήρωση δύο σταδίων ορίζεται ως η χρήση δύο υπερσυμπιεστών στην σειρά με διαφορετικό μέγεθος, π.χ. ένα υψηλότερο στάδιο λειτουργίας στο παλμικό σύστημα και ένα χαμηλότερης πίεσης στη συνεχή λειτουργίας πίεσης. Αυτό το είδος ρύθμισης χρησιμοποιείται για τους κινητήρες ντίζελ που απαιτούν πολύ υψηλό βαθμό υπερσυμπίεσης, με έργο αποδιδόμενο στον στροφαλοφόρο (bmer - Brake Mean Effective Pressure) να κυμαίνεται από 25 έως 30 bar, το οποίο δεν είναι εφικτό σε έναν υπερπληρωτή μιας φάσης.

Υπερπλήρωση κατά Miller

Το σύστημα υπερσυμπίεσης βασίζεται στην ιδέα της αύξησης του δείκτη επέκτασης σε σχέση με την αναλογία συμπίεσης μέσω του πρόωρου κλεισίματος των βαλβίδων εισαγωγής, καθώς αυξάνεται η υπερπλήρωση. Η υπερσυμπίεση κατά Μίλερ δεν είναι ιδιαίτερα ελκυστική εκτός και αν είναι απαραίτητη η υπερπλήρωση δύο σταδίων για άλλους λόγους, όπως η ανάγκη να μειωθούν οι βλάβες των βαλβίδων καυσαερίων.

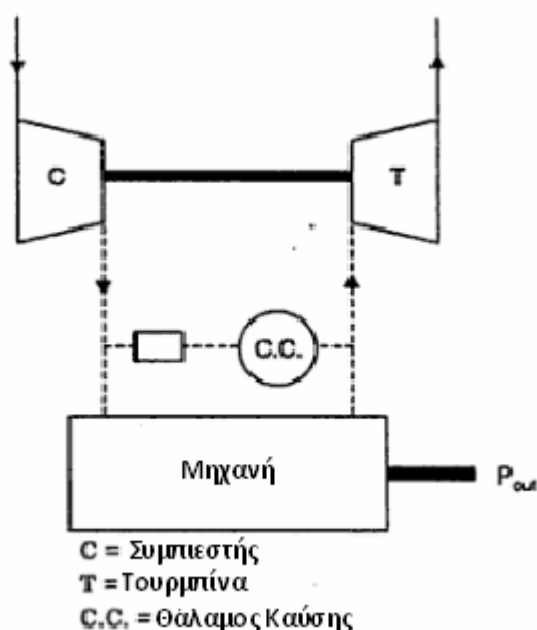
Υπερσυμπίεση υψηλής πίεσης

Η εικόνα 1.4 δείχνει έναν υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα υψηλής πίεσεως. Αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

1. έναν χαμηλής συμπίεσης πετρελαιοκινητήρα,
2. έναν υψηλής αναλογίας πίεσης στρόβιλο,
3. ένα σύστημα ελέγχου παράκαμψης, και
4. έναν βοηθητικό θάλαμο καύσης που βρίσκεται μεταξύ της άμεσης βαλβίδας καυσαερίων και της τουρμπίνας του υπερσυμπιεστή.

Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται υπερσυμπιεστής μίας βαθμίδας, που περιλαμβάνει όμως και βαθμίδα μετάκαυσης πριν την εκτόνωση των καυσαερίων στην τουρμπίνα. Ο καυστήρας αυτός μπαίνει σε λειτουργία κάτω από έναν ορισμένο αριθμό στροφών του κινητήρα διατηρώντας έτσι μεγάλη ταχύτητα της τουρμπίνας και του συμπιεστή, κι

επομένως σταθερή υπερσυμπίεση και σταθερή ροπή και στις μικρές ταχύτητες του κινητήρα. Επιπλέον, για το ξεκίνημα, με μια διακλάδωση (by pass) του αέρα εισαγωγής το σύστημα μετατρέπεται προσωρινά σε αεριοστρόβιλο. Έτσι ο συμπιεστής φτάνει σ' έναν αριθμό στροφών τέτοιο που να επιτρέπει ικανοποιητική παροχή του αέρα για να ξεκινήσει η λειτουργία του κινητήρα. Τότε η διακλάδωση κλείνει και ο αέρας διοχετεύεται πλέον στους κυλίνδρους, συμπιεσμένος και ζεστός αρκετά, για να γίνει το ξεκίνημα χωρίς προβλήματα. Επίσης η διακλάδωση χρησιμοποιείται για να μπορεί να υπάρχει σταθερή ροή αέρα από το συμπιεστή, άσχετα με τις απαιτήσεις της μηχανής, διοχετεύοντας τον περισσευούμενο αέρα προς την εξαγωγή.



Εικόνα 1.4 Υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας υψηλής πίεσης

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος είναι το πανεύκολο ξεκίνημα τού κρύου κινητήρα, η μεγάλη και σχετικά σταθερή σ' όλο το εύρος των στροφών ροπή και η γρήγορη απόκριση. Μπορεί να επιτευχθεί υψηλή μέση πραγματική πίεση πέδησης 30 bar, με την μέγιστη πίεση να περιορίζεται σε 140 bar, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν εξαιρετική δύναμη κατά αναλογία βάρους. Από την άλλη πλευρά η κατανάλωση αυξάνει, όταν λειτουργεί ο καυστήρας και το σύστημα παροχής καυσίμου που απαιτείται γι' αυτόν προσθέτει κόστος, πολυπλοκότητα και προβλήματα αξιοπιστίας. [10]

1.4.1 Μέθοδοι Υπερπλήρωσης τετράχρονων και δίχρονων μηχανών

Η υπερπλήρωση των τετράχρονων μηχανών επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:

1. με εξηρητημένες αντλίες από την κύρια μηχανή,
2. με ανεξάρτητες αντλίες αέρα που κινούνται με ηλεκτροκινητήρα,
3. με την μέθοδο Buchi, όπου λειτουργεί ένας αεριοστρόβιλος ο οποίος κινείται με τα καυσαέρια που βγαίνουν από του κυλίνδρους της μηχανής, και
4. με συνδυασμό μηχανικής κίνησης και στροβιλοφουσητήρα.

Ο τρόπος λειτουργίας της δίχρονης μηχανής παρουσίαζε δυσκολίες στην εφαρμογή της υπερπλήρωσης σ' αυτήν. Οι δυσκολίες αυτές οφείλονταν στους παρακάτω λόγους:

- Η δίχρονη μηχανή έχει ανάγκη μεγαλύτερης ψύξης λόγω των συχνότερων φάσεων καύσης.
- Χρειάζεται να κατασκευαστεί με μέταλλα μεγάλης αντοχής.
- Ο βαθμός απόδοσης του στροβιλοφουσητήρα πρέπει να είναι αρκετός σε όλα τα φορτία.
- Λόγω του ελάχιστου χρόνου για να κλείσει ο κύκλος λειτουργίας κατά την σάρωση δεν πρέπει να παρουσιάζεται το φαινόμενο της αντίθλιψης κατά την εξαγωγή των καυσαερίων.
- Λόγω της γρήγορης σάρωσης τα καυσαέρια κρυώνουν κατά ένα ποσοστό με συνέπεια να πέφτει ο βαθμός απόδοσης του στροβιλοφουσητήρα ειδικότερα στα χαμηλά φορτία.

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα βρέθηκαν κάποιες μέθοδοι και τεχνικές βελτιώσεις. Αυτές είναι:

1. η Μέθοδος Διάταξης εν σειρά (Διάταξη Curtis),
2. η Μέθοδος Παράλληλης Διάταξης και
3. η Μέθοδος Μικτής Διάταξης.

1.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της υπερσυμπιέσης βενζινοκινητήρων περιλαμβάνουν:

1. Ανώτερη ροπή για επιτάχυνση από χαμηλές στροφές.
2. Χαμηλότερο θόρυβο και εκπομπές καυσαερίων.
3. Καλύτερη οικονομία καυσίμου λόγω της μείωσης της αντλούμενης ενέργειας που δαπανάται κατά τη διάρκεια της επαγωγής. Το πλεονέκτημα αυτό σπάνια επιτυγχάνεται στην πράξη, επειδή πολλοί οδηγοί αλλάζουν την τεχνική οδήγησής τους για να επωφεληθούν πλήρως από την επιπλέον ισχύ του υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα.
4. Αύξηση της ισχύος κατά 50-100% για τετράχρονες μηχανές των ίδιων στροφών και για μηχανές με μεγάλη υπερπλήρωση αύξηση 200%, ενώ για δίχρονες κατά 40-60% και 100%, αντίστοιχα.
5. Μείωση των διαστάσεων και του βάρους της μηχανής κατά 40% για την ίδια ισχύ.
6. Εκμετάλλευση του χώρου λόγω του μικρότερου όγκου της μηχανής
7. Χαμηλότερο κόστος συντήρησης λόγω μεγαλύτερων διαστημάτων συντηρήσεως.
8. Μεγαλύτερη ευχέρεια καύσης βαρύτερων καυσίμων.

Τα κύρια μειονεκτήματα ενός υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα βενζίνης είναι:

1. Το υψηλότερο αρχικό κόστος του υπερσυμπιεστή και του ανάλογου εξοπλισμού.
2. Το υψηλότερο κόστος επισκευής και συντήρησης, ιδίως όταν παρουσιάζεται πρόβλημα σε άλλα εξαρτήματα του κινητήρα.
3. Σε χαμηλές στροφές του κινητήρα, υπάρχει καθυστέρηση στην απόκριση του κινητήρα μετά από το πάτημα του επιταχυντή.
4. Λόγω των μεγαλύτερων θερμικών καταπονήσεων και τάσεων και λόγω των μεγαλύτερων πιέσεων η κατασκευή της μηχανής χρειάζεται καλύτερης ποιότητας μέταλλα με μεγάλη αντοχή.

Δεδομένου ότι η τουρμπίνα απαιτεί κάποιο χρόνο για να επιτευχθεί η πραγματική

ταχύτητα του, υπάρχει μία καθυστέρηση επιτάχυνσης σε παλαιότερου τύπου μονάδες που συχνά αναφέρεται ως «turbo-lag». [11] Με τον όρο Turbo lag ορίζεται η καθυστέρηση στην αντίδραση που εμφανίζεται την πίεση του πεντάλ μέχρι την ανταπόκριση του γκαζιού. Χρειάζονται ένα με δυο δευτερόλεπτα (ή περισσότερα) για να αναπτυχθεί μια ταχύτητα στην οποία η συμπίεση του αέρα είναι αρκετή ώστε να προβεί σε αύξηση της παραγωγής. [12]

Γενικότερα, η υπερπλήρωση μίας μηχανής εξαρτάται από την αντοχή των εξαρτημάτων της στις τάσεις που προκαλούνται από την υψηλή θερμοκρασία και τις υψηλές πιέσεις λειτουργίας. Όσο περισσότερο αυξάνουν οι πιέσεις τόσο περισσότερο αυξάνονται οι καταπονήσεις της μηχανής και οι απώλειες λόγω αύξησης των τριβών. Οι μεγάλες θερμοκρασίες επιβάλουν μεγαλύτερο πάχος και καλύτερη ποιότητα των μετάλλων κατασκευής οπότε αυξάνουν το κόστος της μηχανής, μικραίνουν όμως τον κίνδυνο καταστροφής από φθορές λόγω της θερμοκρασίας των κεφαλών των εμβόλων, των βαλβίδων, των εδρών, των ελατηρίων και των καυστήρων. Όλα τα παραπάνω αντιμετωπίζονται με καλή λίπανση και ψύξη της μηχανής.

2. TURBOCHARGERS

2.1 Θεωρητική προσέγγιση

Ένας υπερσυμπιεστής είναι ένας στρόβιλος, ο οποίος εκμεταλλεύεται την υψηλή ενέργεια των καυσαερίων που εξέρχονται από του κυλίνδρους και περιστρεφόμενος κινεί τον συμπιεστή με τον οποίο βρίσκεται συνδεδεμένος στον ίδιο άξονα. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ποσότητα του αέρα που ο κινητήρας μπορεί να καταναλώσει και αυξάνει την ογκομετρική απόδοση. Πυκνότερος αέρας σημαίνει ότι στον κινητήρα μπορούν να καίγονται περισσότερα άτομα αέρα και περισσότερα άτομα καυσίμου. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να έχει περισσότερη ενέργεια.

Οι περισσότεροι σύγχρονοι υπερτροφοδοτούμενοι κινητήρες φαίνεται να είναι τετρακύλινδροι και συχνά έχουν την ίδια ή μεγαλύτερη δύναμη από έναν απλό εξακύλινδρο, μη υπερτροφοδοτούμενο, κινητήρα. Ο απώτερος σκοπός της υπερσυμπίεσης είναι να αυξηθεί η πυκνότητα του αέρα για να υπάρχει περισσότερο οξυγόνο διαθέσιμο προς καύση. Η ενέργεια από την καύση, η καύση του αέρα και του καυσίμου, είναι αυτό που ωθεί τα έμβολα του κινητήρα προς τα κάτω, δημιουργώντας ενέργεια. Αυτή η αύξηση της πυκνότητας του αέρα ή η ώθηση, εκφράζεται σε πίεση. Στις ΗΠΑ, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μονάδα πίεσης είναι κιλά / τμ. , ή PSI. Άλλες κοινές μονάδες της πίεσης είναι η bar ή α.

2.2 Ιστορία

Η ιστορία του υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα είναι σχεδόν τόσο παλιά όσο και η εφεύρεση του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Σε αυτό το διάστημα ο Gottlieb Daimler (1885) και ο Rudolf Diesel (1896) προσπάθησαν μέσω της προσυμπίεσης του αέρα που παρέχεται στον κινητήρα, να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα και να μειωθεί κατανάλωση καυσίμων. [1]

Σύμφωνα με τους περισσότερους, οι υπερπληρωτές ανακαλύφθηκαν από τον Ελβετό μηχανικό Alfred Buchi. Το 1905 χορηγήθηκε στον Buchi το πρώτο δίπλωμα

ευρεσιτεχνίας για έναν πρακτικό υπερσυμπιεστή καθοδηγούμενο από παλμούς αερίων. Αυτό το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας δεν περιγράφει τους υπερπληρωτές, όπως είναι γνωστοί σήμερα, αλλά έναν στρόβιλο αξονικής ροής και έναν συμπιεστή που μοιράζονται έναν κοινό άξονα με τον κινητήρα όπου εφαρμόστηκαν. Αυτός ο πρώιμος σχεδιασμός δεν αποτέλεσε εμπορική επιτυχία, αλλά έδωσε αφορμή για περαιτέρω εξελίξεις στον τομέα των αεριοστροβίλων και συμπιεστών βοηθώντας την απόδοση του κινητήρα. [2]

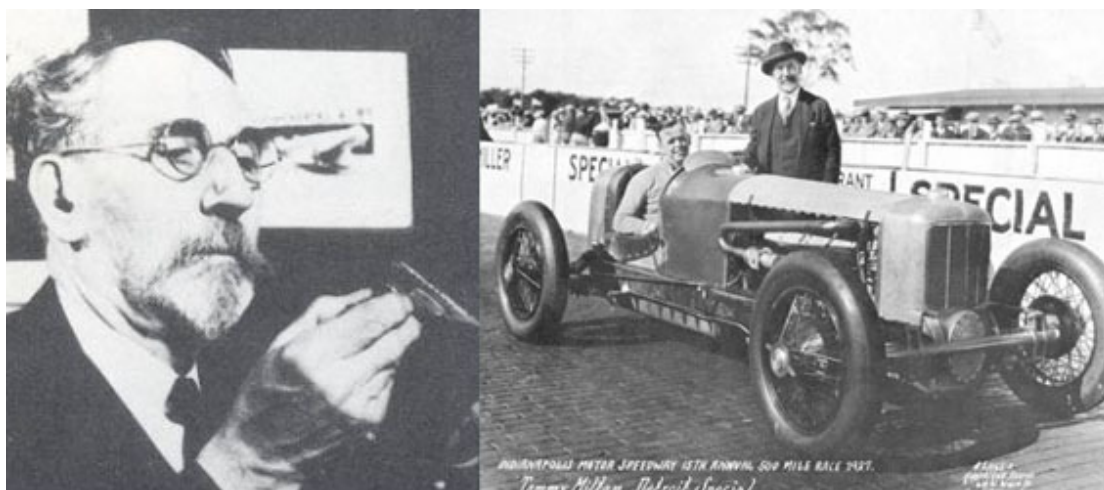


Εικόνα 2.1 Ο Ελβετός μηχανικός Alfred Buchi.

Ο πρώτος υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας κατασκευάστηκε το 1910. Ήταν ένας δίχρονος κινητήρας περιστροφής ο οποίος κατασκευάστηκε από τους Murray και Willat. Με τη χρήση του, μπορούσε να αντισταθμιστεί το πρόβλημα της μείωσης των επιδόσεων των κινητήρων των αεροσκαφών, λόγω της μείωσης της πυκνότητας του αέρα σε μεγαλύτερα υψόμετρα. [1]

Το 1916, ο καθηγητής Auguste C.E. Rateau, ένας γάλλος εφευρέτης της τότε γνωστής τουρμπίνας ατμού, υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Η ευρεσιτεχνία αυτή δεν δημοσιεύθηκε παρά το 1921. [3] Εν τω μεταξύ, κατά τα τέλη του 1917, η Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή για την αεροναυπηγική (NACA), προκειμένου να εξετάσει την ταχεία ανάπτυξη των υπερσυμπιεστών ώστε να υποστηρίξουν την πολεμική προσπάθεια, πλησίασε τον Sanford A. Moss της General Electric. Η έρευνα διεξήχθη στην περιοχή Pikes Peak στο Κολοράντο, περίπου 4.250 μέτρα πάνω από την επιφάνεια

της θάλασσας. Εκείνη την εποχή υπήρχαν θάλαμοι δοκιμών του υψόμετρου για τους κινητήρες των αεροσκαφών, αλλά όχι για μια μηχανή, έναν υπερσυμπιεστή, έναν έλικα, και όλα τα εξαρτήματα. Οι δοκιμές απέδειξαν ότι το επίπεδο της θαλάσσιας δύναμης θα μπορούσε να επιτευχθεί με επιτυχία σε μεγάλο υψόμετρο με ένα υπερπληρωτή, καθιστώντας την υπερσυμπίεση μια λύση για τα στρατιωτικά αεροσκάφη για να επιτύχουν υψηλότερες ταχύτητες και ύψη. [2]



Εικόνα 2.2 Ο Sanford Moss της General Electric

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1920 και 1930, οι υπερπληρωτές έγιναν μια ιδιαίτερα δημοφιλής επιλογή για την ναυτιλία, τους σιδηροδρόμους και τις στατικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. [4] Το 1920 ήταν επίσης ένα σημαντικό έτος για τη συνεχιζόμενη ιστορία των υπερπληρωτών. Ένας υπερπληρωτής με 12-κύλινδρο κινητήρα Liberty είχε εγκατασταθεί σε ένα διπλό αεροπλάνο LaPere για τις δοκιμές υψόμετρου. Επέλεξαν αυτό το αεροπλάνο, όλως παραδόξως, γιατί πίστευαν ότι θα ήταν λιγότερο πιθανό να σπάσει σε περίπτωση πτώσης από μεγάλο ύψος ή αν από μια βουτιά συνεχίσει σε οριζόντια πτήση. Ένας νεαρός άνδρας με το όνομα υπολοχαγός John Macready επιλέχτηκε για να πετάξει το αεροπλάνο, στα 33.113 πόδια. Σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, έγινε ένας από τους πιο έμπειρους σε μεγάλο υψόμετρο πιλότους στον κόσμο, ο οποίος έκανε τις δοκιμές των υπερπληρωτών μέχρι και το 1923. [3]

Το 1923, το ναυπηγείο Vulkan στη Γερμανία είχε παρήγγειλε δύο μεγάλα επιβατικά πλοία, τα οποία θα τροφοδοτούνταν από δύο 10-κύλινδρους, τετράχρονους κινητήρες. Οι υπερπληρωτές αυτοί σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν υπό την επίβλεψη του Buechi. Το 1926 έκαναν την εμφάνιση τους τα πλοία αυτά, τα οποία ήταν τα πρώτα στην ιστορία της ναυτιλίας με υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες.

Το 1925 ένα νέο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Buechi αποτέλεσε την ανακάλυψη που όλοι περίμεναν. Στο δίπλωμα αυτό παρουσιάζονταν λεπτομερώς τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας των παλμών για χαμηλής πίεσης υπερπλήρωση. Το 1926 ιδρύθηκε μια νέα εταιρία με επικεφαλής τον Buechi. Στην εταιρία αυτή ο Brown Boveri κατασκεύαζε τους υπερσυμπιεστές και η SLM παρείχε τους πετρελαιοκινητήρες για έλεγχο και δοκιμές λειτουργίας. Ένας βελτιωμένος, μεγαλύτερος υπερσυμπιεστής ο VT592 δόθηκε στην SLM το 1927 για δεύτερος πειραματικός κινητήρας με εντυπωσιακά αποτελέσματα. [5]

Οι υπερπληρωτές χρησιμοποιήθηκαν με φειδώ στα αεροσκάφη στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, αλλά αναπτύχθηκαν ευρέως μετά τη δεκαετία του 1930, πρώτα στην Ευρώπη και στη συνέχεια στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η General Electric κατασκεύασε υπερπληρωτές για στρατιωτικά αεροσκάφη, πολλά εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για μαχητικά αεροσκάφη και βομβαρδιστικά στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Οι υπερπληρωτές ήταν σε θέση να διατηρούν τον αέρα στους κινητήρες σε υψηλή πυκνότητα σε υψόμετρο πάνω από 30.000 πόδια, παρέχοντας ικανοποιητική ισχύ σε μεγάλα υψόμετρα. Συγκεκριμένα, στα βομβαρδιστικά B-17 και B-29, μαζί με τα μαχητικά P-38 και P-51 είχαν τοποθετηθεί υπερπληρωτές.

Το βομβαρδιστικό B-36 είχε κινητήρες έξι εμβόλων, το καθένα με 28 κυλίνδρους. Το μηχανικό εγχειρίδιο πτήσης για το B-36 αναφέρει ότι χωρίς την υπερτροφοδότηση, το B-36 θα απαιτούσε 90 κυλίνδρους ανά μηχανή για να επετεύχθη η ίδια απόδοση. [3]

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και στις αρχές του 1950, ο Garrett ήταν αυστηρά προσηλωμένος στην σχεδίαση μικρών αεριοστροβίλων από 20 έως 90 ίππους (15 - 67 kw). Οι μηχανικοί είχαν αναπτύξει ένα καλό υπόβαθρο στη μεταλλουργία των περιβλημάτων, λίαν συμπαγή στεγνωτικά, στροβίλους ακτινικής εισροής, και φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Στις 27 Σεπτεμβρίου του 1954, ο Cliff Garrett έλαβε την απόφαση να χωρίσει τον υπερσυμπιεστή από το τμήμα του αεριοστροβίλου λόγω εμπορικών ευκαιριών του υπερσυμπιεστή ντίτζελ. Αυτή ήταν η αρχή ενός νέου

βιομηχανικού κλάδου AiResearch για το σχεδιασμό και την κατασκευή υπερπληρωτών.
[6]

Την δεκαετία του 1950 οι κατασκευαστές κινητήρων ντίζελ άρχισαν να υιοθετούν τους υπερπληρωτές για κινητήρες αυτοκινητοδρόμου. Μεταξύ των πρώτων ήταν η Cummins, η Volvo, της Scania και DAF. Στη δεκαετία του 1950 και του 1960, η βιομηχανία κινητήρων ανέπτυξε νέα σχέδια υπερπληρωτών. Ελαφρύτερα και ισχυρότερα μέταλλα κατέστησαν δυνατή την κατασκευή μεγαλύτερων υπερπληρωτών, με μια σχετικά χαμηλή περιστρεφόμενη μάζα. Κατά την περίοδο αυτή, οι υπερπληρωτές αποτέλεσαν τον βασικό εξοπλισμό στα αγωνιστικά αυτοκίνητα της Ινδιανάπολις και της Φόρμουλα 1. [4]

Τα πρώτα επιβατικά αυτοκίνητα εξοπλισμένα με υπερπληρωτή καυσαερίων ήταν τα Chevrolet Corvair Monza και Oldsmobile Jetfire, τα οποία εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην αγορά των ΗΠΑ το έτος 1962 – 1963. Παρά την μέγιστη τεχνική δαπάνη, εντούτοις, η φτωχή αξιοπιστία τους τα εξαφάνισε γρήγορα από την αγορά.

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι μια μηχανή που καταναλώνει αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το καύσιμο που καίγεται απαιτεί αέρα με τον οποίο μπορεί να συνδυαστεί για να ολοκληρωθεί ο κύκλος καύσης.

Όταν η αναλογία αέρα / καυσίμου φθάσει σε ένα ορισμένο σημείο, η προσθήκη περισσότερων καυσίμων δεν θα παράγουν περισσότερη δύναμη, αλλά μόνο μαύρο καπνό ή μη καμένα καύσιμα στην ατμόσφαιρα. Όσο πιο πυκνός είναι ο καπνός, τόσο περισσότερο τροφοδοτείται ο κινητήρας με καύσιμα. Ως εκ τούτου, η αύξηση της παροχής καυσίμου πέρα από το όριο αναλογίας αέρα / καυσίμου έχει σαν αποτελέσματα την υπερβολική κατανάλωση καυσίμου, τη ρύπανση, την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων (ντίζελ) ή την χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων (βενζίνη) και τη μείωση της διάρκειας ζωής του κινητήρα.

Μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση το 1973, η υπερπλήρωση έγινε πιο αποδεκτή στις εμπορικές εφαρμογές ντίζελ. Μέχρι τότε, το υψηλό κόστος των επενδύσεων της υπερσυμπύεσης αντισταθμιζόταν μόνο από την εξοικονόμηση του κόστους των καυσίμων, η οποία ήταν ελάχιστη. Οι ολοένα και περισσότερο αυστηρές προδιαγραφές εκπομπών ρύπων στα τέλη της δεκαετίας του 80 οδήγησαν σε αύξηση του αριθμού των

υπερτροφοδοτούμενων κινητήρων των φορτηγών, έτσι ώστε σήμερα, ουσιαστικά κάθε μηχανή φορτηγού να είναι υπερτροφοδοτούμενη.

Στη δεκαετία του 70, με την είσοδο των υπερπληρωτών στο μηχανοκίνητο αθλητισμό, ιδιαίτερα στη Formula I αγωνιστικά, ο υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας των επιβατικών αυτοκινήτων έγινε πολύ δημοφιλής. Εκείνη την εποχή, σχεδόν κάθε κατασκευαστής αυτοκινήτων προσέφερε τουλάχιστον ένα κορυφαίο μοντέλο εξοπλισμένο με έναν υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα βενζίνης. Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο εξαφανίστηκε μετά από μερικά χρόνια επειδή, παρόλο που ο υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας βενζίνης ήταν πιο ισχυρός, δεν ήταν οικονομικός.

Η πραγματική επανάσταση στα επιβατικά αυτοκίνητα με υπερσυμπιεστή επιτεύχθηκε το 1978 με την εισαγωγή του πρώτου υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα επιβατικών αυτοκινήτων diesel στην Mercedes-Benz 300 SD, ακολουθούμενο από το VW Golf Turbodiesel το 1981. Με τη βοήθεια του υπερπληρωτή, η αποδοτικότητα του κινητήρα ντίζελ επιβατικών αυτοκινήτων θα μπορούσε να αυξηθεί και να μειωθούν σημαντικά οι εκπομπές. [7]

Σήμερα, η υπερσυμπίεση των κινητήρων βενζίνης δεν αποτελεί μόνο τον κύριο λόγο στην προοπτική απόδοσης, αλλά θεωρείται και το μέσον μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων και, κατά συνέπεια, της ρύπανσης του περιβάλλοντος λόγω των χαμηλότερων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σήμερα, ο κύριος λόγος για την υπερπλήρωση είναι η χρήση του καυσαερίου για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών ρύπων. [7]

2.2 Μεγέθη Στροβιλοϋπερπληρωτών

2.2.1 Μικροί Στροβιλοϋπερπληρωτές

Οι μικρού μεγέθους στροβιλοϋπερπληρωτές χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εμβολοφόρους θερμοκινητήρες με ισχύ από 50 KW έως και 600 KW, βρίσκοντας εφαρμογή κυρίως σε επιβατηγά οχήματα, φορτηγά οχήματα αλλά και σε μικρού μεγέθους πλοία. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, η απλότητα σχεδιασμού και η υψηλή λειτουργική αξιοπιστία. Συνήθως απαρτίζονται από έναν ακτινικό συμπιεστή και έναν ακτινικό στρόβιλο, ενώ τα έδρανα του άξονα

τοποθετούνται ανάμεσα στις δύο περωτές, γεγονός που απλοποιεί εξαιρετικά το σύστημα λίπανσης.

Η περωτή του συμπιεστή κατασκευάζεται με χύτευση από κράματα αλουμινίου, ενώ η αεροδυναμική της σχεδίαση αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ αντοχής, απόδοσης και χυτευτότητας. Παλαιότερα, τα περύγια κατασκευάζονταν τελείως ακτινικά για αυξημένη αντοχή και εύκολη χύτευση, αλλά με μικρή αεροδυναμική απόδοση. Σήμερα ωστόσο, τείνει να επικρατήσει η κατασκευή κεκλιμένων περυγίων καθώς επιτυγχάνουν ομοιόμορφη ροή του αέρα και αυξημένη απόδοση από αεροδυναμική άποψη.

Οι λόγοι πίεσεως που επιτυγχάνουν τέτοιοι συμπιεστές κυμαίνονται μεταξύ 2:1 και 3:1 με τυπικές περιστροφικές ταχύτητες από 70.000 έως 100.000 rpm, ενώ σε ιδιαίτερα μικρά μεγέθη εμφανίζονται αρκετά υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής.

Οι στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται σε τέτοιους στροβιλοϋπερπληρωτές είναι επίσης ακτινικοί με την περωτή τους συγκολλημένη στον άξονα περιστροφής. Η περωτή των στροβίλων συνήθως κατασκευάζεται από κράματα χάλυβα - νικελίου για υψηλή αντοχή στις θερμοκρασιακές και στις φυγοκεντρικές τάσεις. Οι περωτές των στροβίλων έχουν λιγότερα περύγια από τις περωτές των συμπιεστών, αφού οι αεροδυναμικές απαιτήσεις είναι μικρότερες, λόγω της δεδομένης τυρβώδους ροής μέσα από τους στροβίλους. Τα περύγια ωστόσο έχουν μεγαλύτερο πάχος για την αντιμετώπιση των υψηλών λειτουργικών θερμοκρασιών αλλά και ως αντιστάθμιση απέναντι στο φαινόμενο της πάλμωσης (surge) που προκαλείται στην πίεση των καυσαερίων εξαιτίας των παλινδρομήσεων των εμβόλων της μηχανής.

Το σπειροειδές κέλυφος του στροβίλου κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο με σφαιροειδή γραφίτη, καθώς δεν υφίσταται ισχυρές τάσεις. Συνήθως δεν διαθέτει σειρά σταθερών περυγίων πριν από την περωτή. Σταθερά οδηγία περύγια χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις μεγάλου λόγου πίεσεων και όταν προβλέποντας κατασκευάζονται από κράματα χρωμίου-νικελίου για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασιακές καταπονήσεις.

Επειδή η ροή των καυσαερίων μέσα από το στρόβιλο είναι επιταχυνόμενη (τυρβώδης) οι απώλειες είναι πολύ μικρότερες από αυτές του συμπιεστή και οι σχεδιαστικές

απαιτήσεις ανάλογα χαμηλότερες. Έτσι, με μικρές τροποποιήσεις στην περωτή και το σπειροειδές κέλυφος προκύπτει μεγάλη ποικιλία διαφορετικών στροβίλων για διαφορετικές μηχανές.

Συχνά, το σπειροειδές κέλυφος χωρίζεται σε δύο διαφορετικά τμήματα, έτσι ώστε οι κύλινδροι που βρίσκονται ταυτόχρονα στη φάση της εκτόνωσης να εξάγουν μαζί στο ίδιο τμήμα. Κατά συνέπεια, τα καυσαέρια καταλήγουν σε διαφορετικές πλευρές της περωτής του στροβίλου, έτσι που η πίεση του ρεύματος των καυσαερίων εξομαλύνεται χρονικά. Συνήθως, σε κάθε τμήμα του σπειροειδούς κελύφους καταλήγουν οι εξαγωγές τριών κυλίνδρων της μηχανής.

Η έδραση του κοινού άξονα γίνεται σε έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα), των οποίων η υδροδυναμική λίπανση γίνεται με το λιπαντικό της μηχανής. Τα έδρανα ολίσθησης κατασκευάζονται από μπρούτζο, ενώ οι δακτύλιοι τους φέρουν επικάλυψη από λευκό μέταλλο.

Δυστυχώς, τα έδρανα ολίσθησης εμφανίζουν μεγάλες απώλειες ισχύος λόγω μηχανικής τριβής που φτάνουν μέχρι και το 10% της ισχύος του στροβίλου. Ακόμα χειρότερα, οι τριβές είναι μεγαλύτερες στις χαμηλές στροφές, με αποτέλεσμα να πέφτει έντονα η απόδοση της μονάδας σε περιπτώσεις χαμηλών φορτίων από τη μηχανή.

2.2.2 Μεσαίοι Στροβιλοϋπερπληρωτές

Οι μεσαίου μεγέθους στροβιλοϋπερπληρωτές βρίσκουν εφαρμογή σε ταχύστροφες ναυτικές πετρελαιομηχανές. Έχουν παρόμοια διαμόρφωση με τους προηγούμενους, αλλά μεγαλύτερο μέγεθος, μεγαλύτερη αντοχή αλλά και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Κατασκευάζονται ωστόσο σε μικρότερους αριθμούς, γεγονός που ανεβάζει το κόστος της γραμμής παραγωγής.

Οι μεσαίου μεγέθους υπερπληρωτές διαθέτουν επίσης ακτινικό συμπίεστή και ακτινικό στρόβιλο, αλλά μεγαλύτερους λόγους πιέσεων από αυτούς της προηγούμενης κατηγορίας. Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας τους είναι μικρότερη, δηλαδή το φάσμα των περιστροφικών ταχυτήτων που καλύπτουν είναι σημαντικά στενότερο. Χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη διάχυτων με πτερύγια στους συμπίεστες και οδηγών

πτερυγίων στους στροβίλους, γεγονός που αυξάνει βέβαια την απόδοση αλλά και το κόστος κατασκευής.

Το σπειροειδές κέλυφος του στροβίλου συνήθως είναι υδρόψυκτο (με νερό). Αν και η ψύξη μειώνει την απόδοση, καθώς χάνεται χρήσιμη θερμική ενέργεια, είναι συχνά επιβεβλημένη για λόγους ασφάλειας, ιδίως όταν το μηχανοστάσιο διαθέτει περιορισμένο χώρο.

Τα έδρανα είναι παρόμοια με αυτά της μικρότερης κατηγορίας, τοποθετούνται επίσης ανάμεσα στις πτερωτές στροβίλου και συμπιεστή, ενώ συχνά παροχετεύεται αέρας από τον συμπιεστή προς τον χώρο των εδράνων για την ψύξη του αφενός, αλλά και για να εμποδίσει την είσοδο καυσαερίων στο συγκεκριμένο χώρο από τα διάκενα μεταξύ πτερωτής και κελύφους του στροβίλου. Η λίπανση τους γίνεται επίσης με το λάδι της μηχανής.

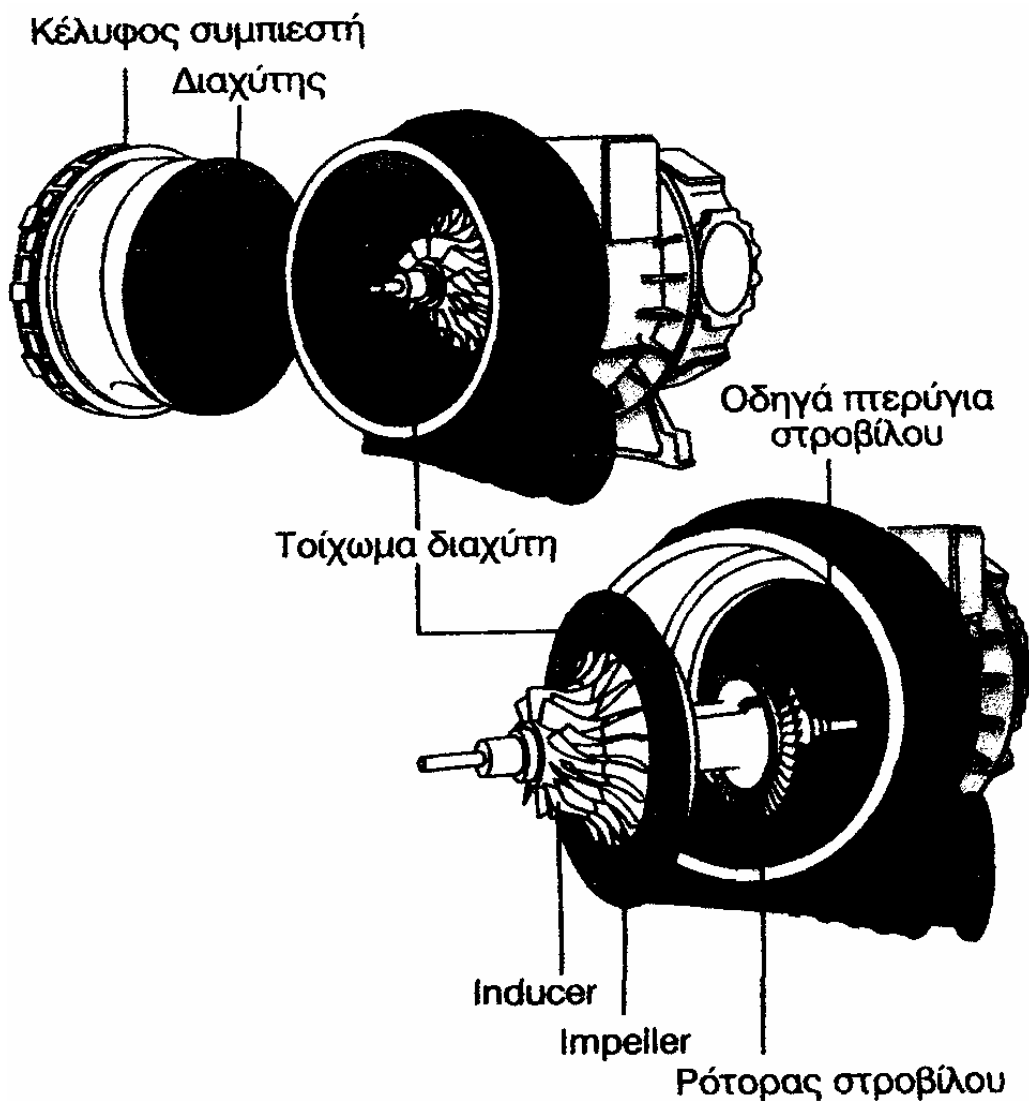
2.2.3 Μεγάλοι Στροβιλοϋπερπληρωτές

Αυτή η κατηγορία Στροβιλοϋπερπληρωτών εγκαθίσταται σε μεσόστροφες ή αργόστροφες, τετράχρονες ή δίχρονες πετρελαιομηχανές. Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι ο (μονοβάθμιος) στρόβιλος αξονικής ροής και η σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Λόγω των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας των μηχανών με τις οποίες συνεργάζονται, οι μεγάλοι μεγέθους στροβιλοϋπερπληρωτές λειτουργούν συνήθως σε υψηλά φορτία.

Η κρισιμότητα του στροβιλοϋπερπληρωτή ως εξάρτημα μιας τέτοιας ναυτικής μηχανής επιβάλλει να είναι ιδιαίτερα στιβαροί ως προς την κατασκευή και κατά το δυνατόν απλοί ως προς την σχεδίαση τους. Δύο βασικές παράμετροι κατά την σχεδίαση υπερπληρωτών αυτής της κατηγορίας είναι η απαιτούμενη υψηλή απόδοση και η ικανότητα προσαρμογής σε διαφορετικούς τύπους μηχανών, με μικρές μετατροπές και χαμηλό κόστος.

Ο συμπιεστής και εδώ είναι ακτινικός. Η πτερωτή του κατασκευάζεται σε δύο τμήματα, τα οποία ενώνονται σε κοινό άξονα. Το πρώτο τμήμα, ο προσαγωγός (inducer), παραλαμβάνει τη ροή του αέρα από την αξονική διεύθυνση και την στρέφει

μερικώς ακτινικά. Το δεύτερο τμήμα, το στροφέιο (impeller) μετατρέπει την ροή σε κυρίως ακτινική. Ο inducer κατασκευάζεται συνήθως με κοπή από χαλυβόκραμα ή με σφυρηλασία από κράμα αλουμινίου. Το στροφέιο, από την άλλη μεριά, κατασκευάζεται συνήθως από τιτάνιο, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα σε αυτό είναι σημαντική.

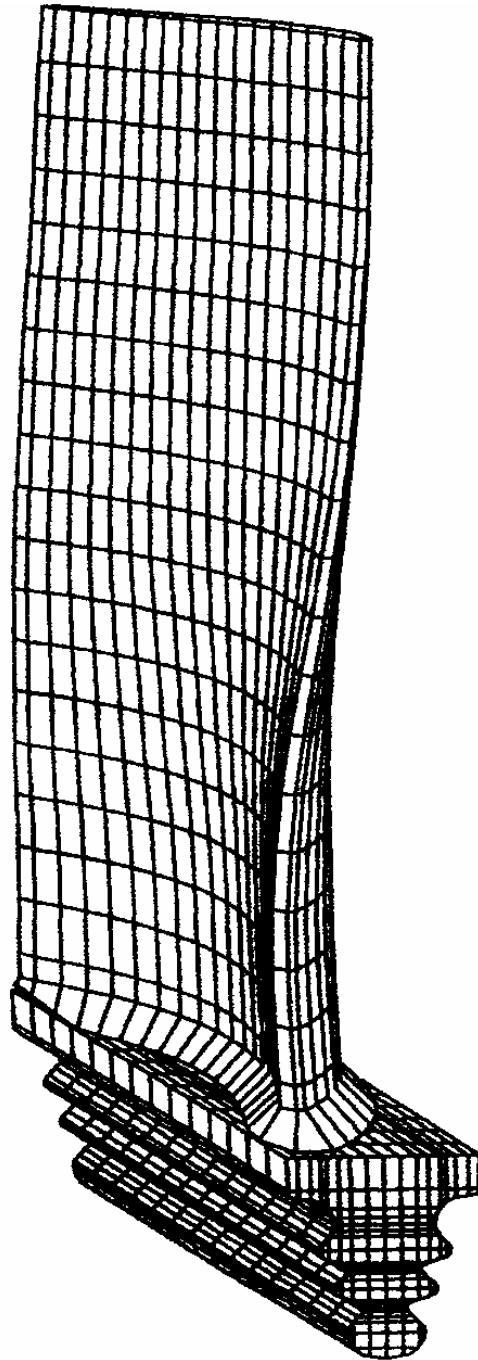


Εικόνα 2.3 Δομή τυπικού στροβιλοϋπερπληρωτή ναυτικής πετρελαιομηχανής

Ο διαχωρισμός της περωτής σε δύο τμήματα γίνεται αναγκαίος για κατασκευαστικούς λόγους, αφού η κατανομή των πτερυγίων του συμπίεστή εμφανίζει έντονη

στρεβλότητα (για αεροδυναμικούς λόγους). Επιπλέον, η τριβή μεταξύ των δύο τμημάτων λειτουργεί ως αποσβεστήρας των ταλαντώσεων των περυγίων.

Ο στρόβιλος είναι αξονικής ροής με οδηγία περυγία και ρότορα. Η πλήμνη (δίσκος) του ρότορα είτε συγκολλείται στον άξονα περιστροφής, είτε συνδέεται μαζί του με σφιχτή συναρμογή.



Εικόνα 2.4 Πτερύγιο στροβίλου αξονικής ροής

Τα περύγια του ρότορα κατασκευάζονται είτε με χύτευση, είτε με σφυρηλάτηση, είτε με κοπή, ενώ το υλικό κατασκευής τους είναι κάποιο υπέρκραμα (super alloy) νικελίου-κοβαλτίου για μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμικές τάσεις και υψηλή αντίσταση σε ερπυσμό (λόγω ισχυρών φυγοκεντρικών δυνάμεων).

Τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά των περυγίων του ρότορα είναι η στρεβλότητα της κατανομής τους και η διαμόρφωση της βάσης τους σε τύπο “ελατόδεντρου” για τη σφήνωση τους στον δίσκο. Με την αλλαγή των γωνιών και του ύψους των περυγίων στάτορα και ρότορα, προκύπτουν στρόβιλοι με διαφορετικές δυνατότητες ως προς την παροχή και την πτώση πίεσης, όλοι τους όμως είναι βασισμένοι στην ίδια σχεδίαση.

Η επιλογή στροβίλου αξονικής ροής είναι μονόδρομος για τέτοια μεγέθη στροβιλοϋπερπληρωτών, αφού η επιλογή στροβίλου ακτινικής ροής θα οδηγούσε σε μεγάλη αύξηση του βάρους και του όγκου της εγκατάστασης. Ωστόσο, η χρήση αξονικού στροβίλου συνοδεύεται από προβλήματα σχεδίασης του αγωγού προσαγωγής των καυσαερίων στον στάτορα με τρόπο ώστε να γίνεται ομοιόμορφη κατανομή τους σε ολόκληρο το δίσκο. Σε στροβίλους ακτινικής ροής δεν υπάρχει αντίστοιχο πρόβλημα, καθώς το σπειροειδές κέλυφος εξασφαλίζει ικανοποιητική κατανομή.

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες στροβιλοϋπερπληρωτών, εδώ τα έδρανα τοποθετούνται συνήθως έξω από τις περωτές. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι η μείωση των δυναμικών καταπονήσεων, η εύκολη πρόσβαση και η απλή λίπανση. Η διάταξη αυτή όμως έχει και μειονεκτήματα, καθώς δημιουργεί προβλήματα στην σχεδίαση των αγωγών εισαγωγής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων ενώ εμποδίζει επίσης την εύκολη πρόσβαση για έλεγχο και συντήρηση των περυγίων του συμπιεστή και του στροβίλου.

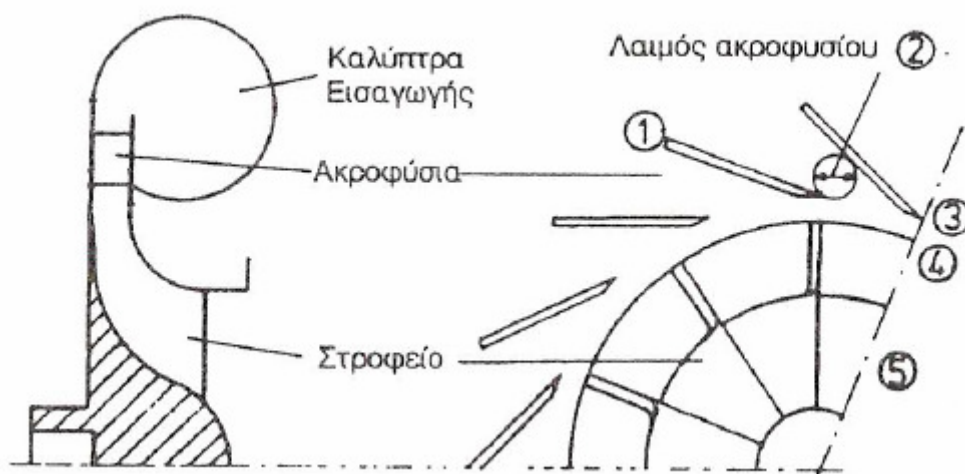
2.3 Ανατομία

Τα βασικά στοιχεία του στροβιλοσυμπιεστή είναι ο στρόβιλος, ο συμπιεστής, οι σύνδεσμοι του άξονα, τα έδρανα (ρουλεμάν) και τα κελύφη.

2.3.1 Στρόβιλος

Ο στρόβιλος ή τουρμπίνα, είναι ένας κινητήρας που εξάγει ενέργεια από τη ροή ενός ρευστού και τη μετατρέπει σε ωφέλιμο έργο. Αν το ρευστό είναι αέριο καλείται αεριοστρόβιλος ενώ αν είναι ρευστό λέγεται υδροστρόβιλος. Ο στρόβιλος γενικά μπορεί να είναι τόσο ακτινικής όσο και αξονικής ροής.

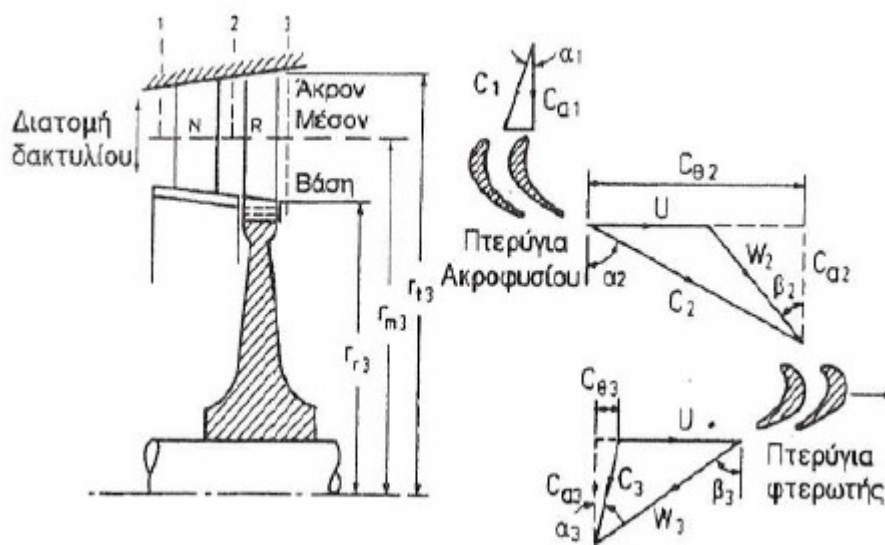
Ο αεριοστρόβιλος ακτινικής ροής χαρακτηρίζεται από την συμπαγή και στιβαρή κατασκευή του, ενώ πλεονεκτεί και ως προς τη μέθοδο κατασκευής αφού κατασκευάζεται με χύτευση. Έχει εφαρμογή σε μικρού μεγέθους στροβιλοσυμπιεστές και σε κινητήρες που χρησιμοποιούν ελαφρά κλάσματα, αφού παρουσιάζονται δυσκολίες στην απομάκρυνση κατά τη λειτουργία σωματιδίων που επικάθονται σε αυτόν. Για μεγαλύτερες κατασκευές το βάρος αυξάνεται σημαντικά ενώ και η χύτευση μεγάλων κομματιών παρουσιάζει δυσκολίες. Οι απώλειες πίεσης που οφείλονται στη μείωση του μεγέθους για τους αξονικούς στροβίλους δεν επηρεάζουν την λειτουργία τους σε υψηλές πιέσεις. Στους αεριοστρόβιλους ακτινικής ροής τα καυσαέρια οδηγούνται στο στροφείο μέσω ενός σπειροειδούς κελύφους το οποίο δίνει τη συστροφή στη ροή. Πριν το στροφείο μπορεί να παρεμβάλλεται μια σταθερή περύγωση η οποία χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη γωνία προσπτώσεως της ροής στα κινητά πτερύγια. Με κατάλληλη ρύθμιση της κλίσεως των σταθερών πτερύγιων είναι δυνατή η ρύθμιση της παροχής καυσαερίων, της ισχύος και των στροφών του στροβίλου.



Εικόνα 2.5 Ακτινικός στρόβιλος

Οι αεριοστρόβιλοι αξονικής ροής μπορεί να είναι μίας ή (σπάνια) δυο βαθμίδων. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά σταθερών πτερύγιων που ακολουθείται από μια σειρά κινητών πτερύγιων. Μέσα στον στάτορα η ροή αποκτά συστροφή την οποία αφαιρεί το στροφέιο απορροφώντας ενέργεια από το ρευστό. Τα πτερύγια του στροβίλου επειδή διαβρέχονται από τα καυσαέρια, λειτουργούν σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής τους δημιουργεί ισχυρές φυγοκεντρικές δυνάμεις οι οποίες σε συνδυασμό με τη υψηλή θερμοκρασία καταπονούν ιδιαίτερα τα πτερύγια. Επιπλέον στην περίπτωση υπάρξεως συστήματος παλμών δημιουργούνται ισχυρές ταλαντώσεις στα πτερύγια. Λόγο των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και της οριακής φορτίσεως θα πρέπει να ελέγχεται συνεχώς η μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων. [14]

Ο στρόβιλος έχει δύο κύρια συστατικά, την τουρμπίνα και το κέλυφος της. Τα καυσαέρια του κινητήρα δρομολογούνται στον στρόβιλο με την πολλαπλή εξαγωγή και εισέρχεται στο στόμιο του στροβίλου. Τα καυσαέρια γεμίζουν το κέλυφος και δημιουργούν μια στατική πίεση μέσω μιας ελικοειδούς σπείρας η οποία τροφοδοτεί την τουρμπίνα στην άκρη της ή την περιοχή του επαγωγέα της τουρμπίνας. Δεδομένου ότι η υψηλή πίεση επιδιώκει πάντα χαμηλή πίεση, τα καυσαέρια ρέουν μέσω της τουρμπίνας και τα αέρια υψηλής πίεσης διαστέλλονται καθώς ταξιδεύουν μέσω της τουρμπίνας. Αυτή η διαστολή των καυσαερίων είναι η κινητήριος δύναμη της τουρμπίνας εκ περιτροπής μέσα στο κέλυφος της τουρμπίνας. [2]



2.3.2 Συμπιεστής

Υπάρχουν δύο κύρια στοιχεία του συμπιεστή: το γρανάζι και το κάλυμμα του συμπιεστή. Για την βασική κατανόηση των συμπιεστών, είναι σημαντική η αναθεώρηση ορισμένων από τους εμπλεκόμενους θερμοδυναμικούς νόμους. Ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς σε σχέση με τους υπερσυμπιεστές προέρχεται από τον πρώτο νόμο της Θερμοδυναμικής για το ιδανικό αέριο. Ο νόμος περί ιδανικού αερίου ορίζει ότι η σχέση μεταξύ του όγκου (V), της πίεσης (P) και της θερμοκρασίας (T) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{PV}{T} = \text{σταθερό},$$

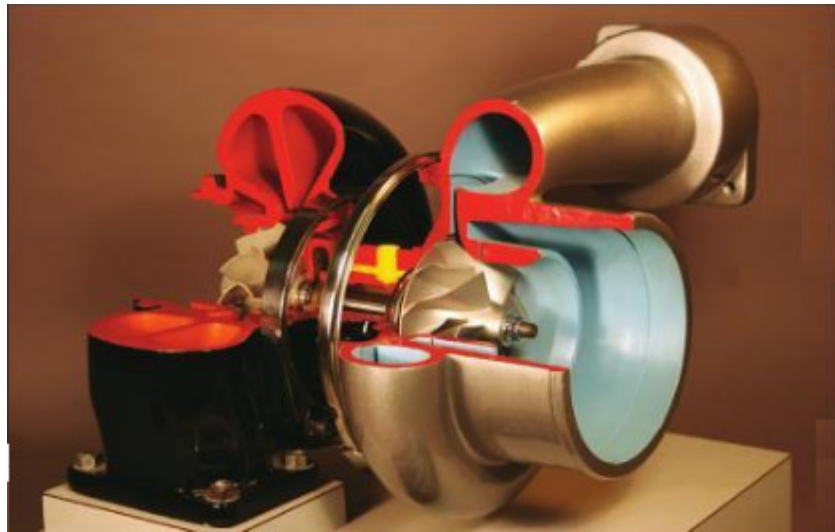
όπου P = η πίεση αερίου,

V = ο όγκος που καταλαμβάνει,

T = η θερμοκρασία του αερίου.

Ουσιαστικά, αν ο όγκος είναι μια σταθερά, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτελέσματα μια ανάλογη αύξηση της πίεσης. Αν η πίεση είναι σταθερή, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μια ανάλογη αύξηση του όγκου. Αντίθετα, αν μειωθεί ο όγκος και η πίεση παραμένει σταθερή, η θερμοκρασία πρέπει να μειωθεί. Η πίεση και ο όγκος είναι ευθέως ανάλογα με τη θερμοκρασία, και αντιστρόφως ανάλογα μεταξύ τους.

Κάθε συμπιεστής έχει τη βέλτιστη αποτελεσματικότητα ροής, τη μέγιστη ικανότητα ροής, και ένα σημείο πίεσης, κάτω από το οποίο δεν θα υπάρχει ή θα σταματήσει η εισροή μιας συγκεκριμένης ποσότητας μάζας. Όταν ένας συμπιεστής λειτουργεί στη μέγιστη αποδοτικότητα ροής εντός του εύρους του, η αποδοτικότητα αυτή εκφράζεται ως ποσοστό του πόσο καλύπτονται οι μαθηματικές απαιτήσεις του νόμου ιδανικού αερίου.



Εικόνα 2.7. Τυπικός υπερσυμπιεστής.

Η 90° τομή του παρουσιάζει όλα τα εσωτερικά μέρη του.

Αν ένας συμπιεστής ήταν 100% αποτελεσματικός, τότε η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή θα μπορούσε ουσιαστικά να υπολογιστεί, γνωρίζοντας μόνο την θερμοκρασία εισόδου και την πίεση εκκένωσης. Ένας τέτοιος συμπιεστής ονομάζεται αδιαβατικός συμπιεστής. Όταν ένας συμπιεστής αναφέρεται ότι έχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο απόδοσης της τάξεως του 76%, ουσιαστικά σημαίνει ότι έχει τη δυνατότητα να συμπιέσει αέρα με 76 % αδιαβατικό επίπεδο αποδοτικότητας. Ωστόσο, η αδιαβατική απόδοση του συμπιεστή δεν θα φτάσει ποτέ το 100%, καθώς υπάρχουν παράγοντες που προσθέτουν ανεπιθύμητη, αλλά αναπόφευκτη θερμότητα. Η επιτάχυνση του αέρα προκαλεί εσωτερικές τριβές μεταξύ των μορίων του αέρα, οι τρέχουσες αποστάσεις περιγράμματος προκαλούν ολίσθηση και επιπλέον επιπτώσεις της εσωτερικής τριβής του αέρα, η γρήγορη μετάβαση του αέρα σε όλα στα τμήματα των τροχών και στο κάλυμμα του συμπιεστή προκαλεί θερμότητα από τις τριβές.

Το γρανάζι του υπερσυμπιεστή ονομάζεται ακτινικός (φυγοκεντρικός) συμπιεστής επειδή εισάγει φρέσκο αέρα και τον επιταχύνει ακτινωτά, ή τον περιστρέφει κατά 90 μοίρες, σε αντίθεση με τους αξονικούς συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες που επιταχύνουν τον αέρα με ήδη υπάρχουσα κατεύθυνση.



Εικόνα 2.8. Compressor Wheel

Οι περισσότεροι τροχοί συμπίεσής έχουν γίνει από διάφορα κράματα αλουμινίου. Ωστόσο, υπάρχουν όλο και περισσότερες εφαρμογές που ωθούν τα όρια που μπορούν να αντέξουν τα σημερινά κράματα αλουμινίου, και αυτό διότι όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του αλουμινίου, τόσο μικρότερη είναι η διάρκεια του κύκλου ζωής του. Αυτό συνήθως δεν αποτελεί πρόβλημα στην απόδοση εφαρμογών όπου οι ώρες που απαιτούνται είναι σχετικά λίγες.

Σε μερικές εμπορικές και αγωνιστικές εφαρμογές άρχισαν να χρησιμοποιούν τροχούς τιτανίου σε πενταξονικούς μύλους. Ενώ οι τροχοί αυτοί είναι εξαιρετικά ακριβοί, τείνουν να λύσουν μερικά από τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε περιπτώσεις εφαρμογών υψηλής ώθησης. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα κράματα αλουμινίου είναι περισσότερο από επαρκή.

Το γρανάζι είναι ισορροπημένο σε δύο επίπεδα. Επειδή οι τροχοί του υπερσυμπίεσής περιστρέφονται σε τόσο υψηλές ταχύτητες, η ισορροπία είναι κρίσιμης σημασίας για τη σωστή λειτουργία και διάρκεια του. Το γρανάζι έχει συσταθεί για ειδικά σχεδιασμένα μηχανήματα ισορροπίας και ορίζεται από δυο επίπεδα ισορροπίας. Οι προδιαγραφές ισορροπίας καθορίζονται από τον κατασκευαστή με βάση το μέγεθος του υπερπληρωτή και την προβλεπόμενη λειτουργική ταχύτητα.

Υπάρχουν διάφορα είδη γραναζιών που έχουν χρησιμοποιηθεί στην πορεία των χρόνων.

- Ευθείας ακτινωτής διάταξης. Δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σήμερα. Αναπτύσσουν αυξημένη πίεση αλλά δεν είναι πολύ αποτελεσματικά. Αναγνωρίζεται εύκολα από τις λεπίδες που έρχονται σε ευθεία γραμμή κάθετα προς τον άξονα περιστροφής.
- Πλήρων λεπίδων. Χρησιμοποιείται σπάνια και συνήθως σε εφαρμογές χαμηλότερης ταχύτητας. Πιστεύεται ότι παράγει κάπως υψηλότερη πίεση, τείνει

να έχει προβλήματα με τον αέρα σε υψηλότερες ταχύτητες. Όλες οι λεπίδες αναπτύσσονται σε όλο το μήκος από την μέγιστη διάμετρο του τροχού προς τον επαγωγέα ή το στόμιο εισόδου του.

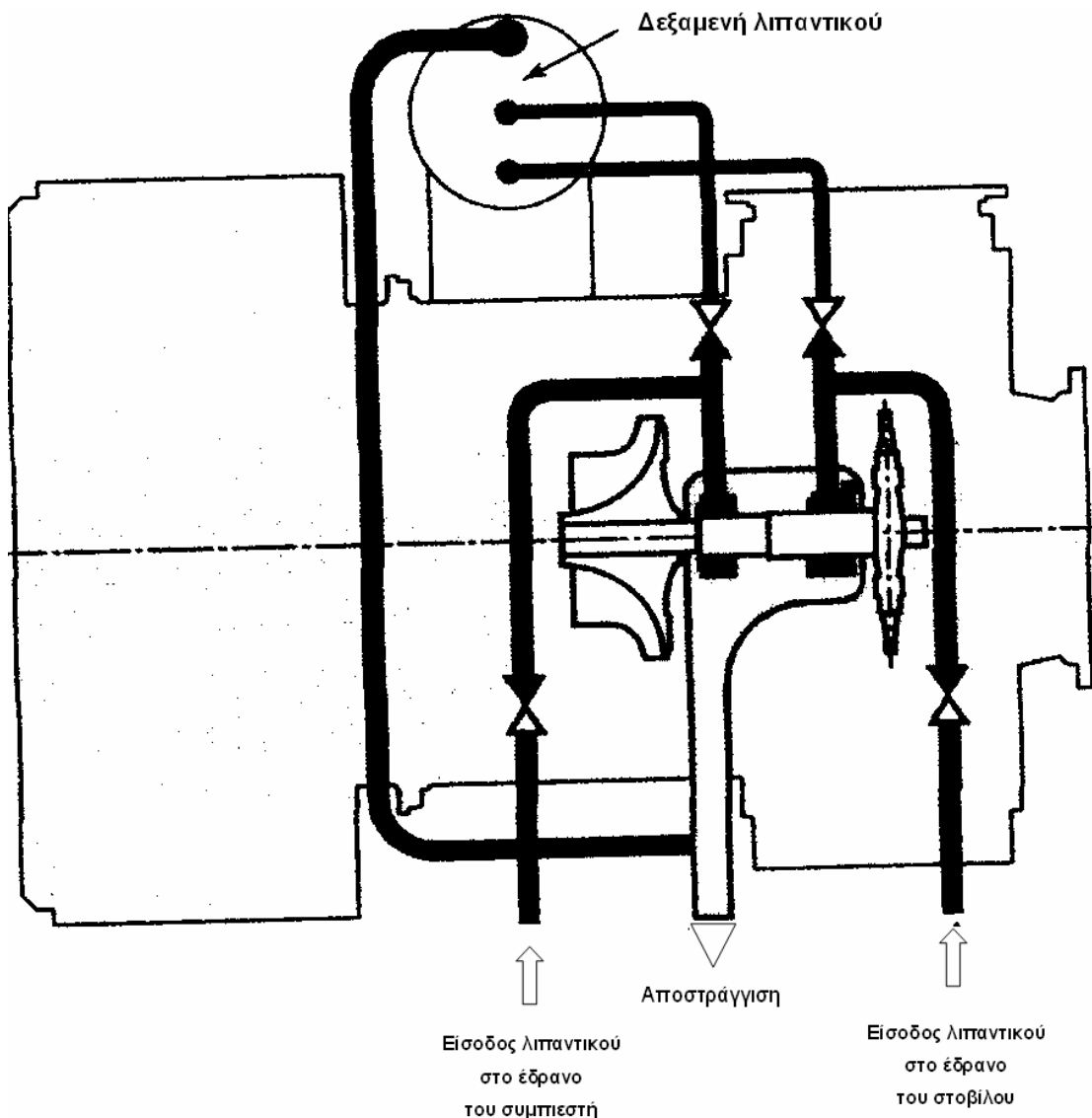
- Με διαχωριστικές λεπίδες. Στην περίπτωση αυτή κάθε επόμενη λεπίδα είναι κοντότερη από την πλήρη λεπίδα δίπλα της. Το μεγαλύτερο κενό ανάμεσα στις πλήρεις λεπίδες επιτρέπει την μεγαλύτερη ροή αέρα σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής.
- BCI. Είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο σήμερα. Αφορά στο τμήμα της λεπίδας που πλησιάζει την μεγαλύτερη διάμετρο. Βοηθά να ξεκινήσει η διάχυση του αέρα επιβραδύνοντας την ταχύτητα του αέρα προτού εξέλθει καθιστώντας έτσι το εύρος της ροής του αέρα μεγαλύτερο στις υψηλότερες περιοχές αποδοτικότητας της λειτουργίας.
- Χωρίς οπή. Είναι από τα πιο πρόσφατα. Δεν υπάρχει η κλασική οπή στο κέντρο του γранаζιού. Περνά κατευθείαν μέσα από την περιοχή με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση πίεσης στον τροχό. Μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων περιστροφής. [2]

2.3.3 Έδρανα

Έδρανα υπάρχουν δύο ειδών, τα έδρανα ολίσθησης και τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν). Τα έδρανα εν γένει χρησιμεύουν σαν «υποδοχείς» των αξόνων και των ατράκτων. Τα έδρανα λιπαίνονται για να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά οι απώλειες τριβών και οι θερμοκρασίες.

Η λίπανση των εδράνων του κοινού άξονα στροβίλου-συμπιεστή σε υπερπληρωτές ναυτικών πετρελαιομηχανών γίνεται είτε με το λάδι της κύριας μηχανής, είτε με ανεξάρτητο σύστημα λίπανσης. Με την πρώτη επιλογή δεν υπάρχει ανάγκη για χωριστά ψυγεία, φίλτρα και αντλίες λαδιού και δεν απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος και αλλαγή λαδιών στην μονάδα υπερπλήρωσης. Η όλη διαδικασία είναι έτσι απλούστερη και ασφαλέστερη. Με την υιοθέτηση ανεξάρτητου συστήματος λιπάνσεως γίνεται δυνατή η χρήση λαδιού με μικρότερο ιξώδες, γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με την αντικατάσταση των εδράνων ολίσθησεως με έδρανα κυλίσεως οδηγεί σε σημαντική μείωση των τριβών στα έδρανα. Έτσι αυξάνεται σημαντικά ο βαθμός απόδοσης του

στροβιλοϋπερπληρωτή, διευκολύνεται η εκκίνηση του και ευνοείται ο χειρισμός υψηλών φορτίων από τη μηχανή.



Εικόνα 2.9 Ανεξάρτητο σύστημα λιπάνσεως εδράνων σε στροβιλοϋπερπληρωτή

Η λίπανση των εδράνων συνεχίζεται και μετά το σταμάτημα της μηχανής, ειδικά για το έδρανο από την πλευρά του στροβίλου. Αυτό είναι απαραίτητο, ώστε η θερμότητα από το κέλυφος του στροβίλου να μην αυξήσει την θερμοκρασία των εδράνων και του άξονα, προκαλώντας έτσι την καταστροφή τους. Στην περίπτωση που το κέλυφος του στροβίλου είναι ψυχόμενο, δεν απαιτείται λίπανση κατά την παύση της μηχανής.

Μερικοί στροβιλοϋπερπληρωτές χρησιμοποιούν ένσφαιρα έδρανα κύλισης αντί για κουζινέτα υδροδυναμικής λίπανσης. Ωστόσο, δεν πρόκειται για συνήθη ρουλεμάν. Τέτοια έδρανα είναι κατασκευασμένα από εξαιρετικά ανθεκτικά υλικά και διαμορφωμένα με υψηλή ακρίβεια, ώστε να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα φορτία, τις ταχύτητες και τις θερμοκρασίες της μονάδας. Με την χρήση τέτοιων εδράνων, ο άξονας της τουρμπίνας περιστρέφεται από συνθήκες χαμηλής τριβής, ενώ επιτρέπεται παράλληλα η χρήση ελαφρύτερου άξονα, γεγονός που μειώνει την αδράνεια και βοηθάει στην μείωση της προαναφερθείσας υστέρησης απόκρισης. [13]

2.3.4 Κελύφη Συμπιεστή & Στροβίλου

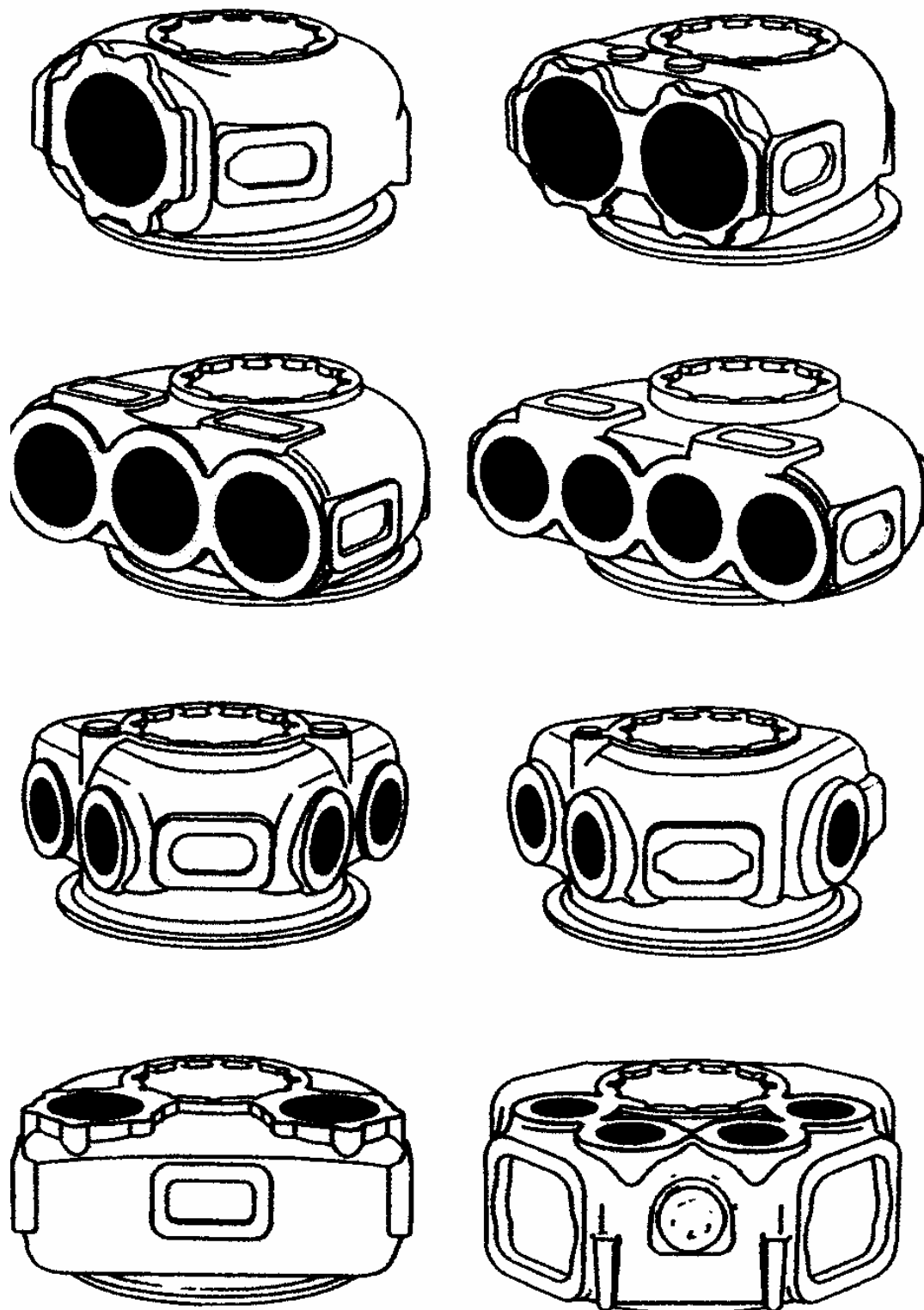
Το κέλυφος του στροβίλου κατασκευάζεται συνήθως από χυτοσίδηρο και μπορεί να είναι ψυχόμενο με νερό ή αερόψυκτο. Στην πρώτη περίπτωση μειώνονται οι κίνδυνοι αστοχίας των εδράνων αλλά αυξάνονται οι θερμικές απώλειες εις βάρος της διαθέσιμης ενέργειας των καυσαερίων. Στη δεύτερη περίπτωση, μειώνεται η πολυπλοκότητα και το βάρος της κατασκευής, αποφεύγεται ο κίνδυνος διαβρώσεως από το ψυκτικό μέσο και παραμένει άθικτη η διαθέσιμη ενέργεια των καυσαερίων. Για την προστασία των εδράνων, το εσωτερικό τμήμα του κελύφους του στροβίλου φέρει θερμομονωτική επένδυση.

Το κέλυφος του στροβίλου αποτελεί το κύριο δομικό στοιχείο του στροβιλοϋπερπληρωτή. Είναι το τμήμα της μονάδας το οποίο συνδέεται άμεσα με την κύρια μηχανή και σε αυτό προσαρμόζονται τα υπόλοιπα τμήματα της μονάδας. Για τον ίδιο στροβιλοϋπερπληρωτή διατίθενται συνήθως διαφορετικά κελύφη εισαγωγής των καυσαερίων για προσαρμογή σε διαφορετικούς κινητήρες.

Το κέλυφος του συμπιεστή κατασκευάζεται σε δύο τμήματα: το τμήμα εισαγωγής και το τμήμα εξαγωγής. Το υλικό είναι συνήθως το αλουμίνιο και η μέθοδος διαμόρφωσης είναι η χύτευση.

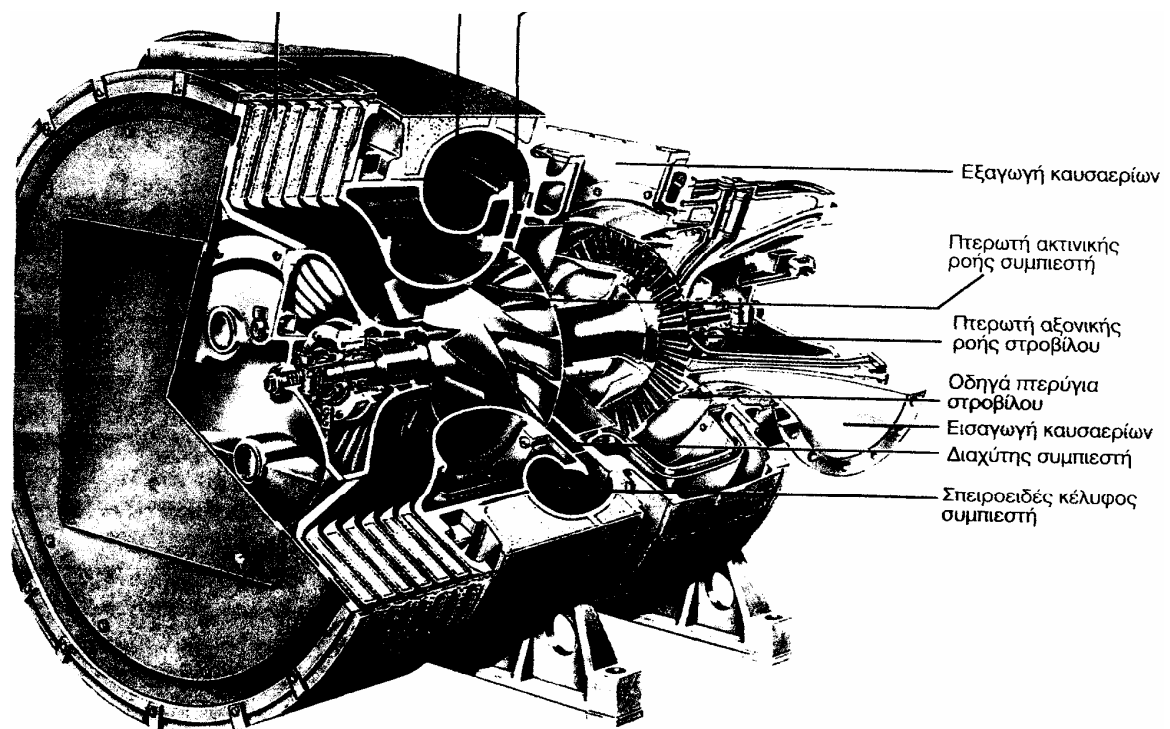
Το τμήμα εισαγωγής περιλαμβάνει το φίλτρο αέρα και τον σιγαστήρα θορύβου (εικόνα 15). Ο σιγαστήρας (silencer) αποτελείται από μεταλλικά ελάσματα με επένδυση απορροφητικού υλικού. Τα ηχητικά κύματα που προέρχονται από την λειτουργία του

συμπιεστή μερικώς ανακλώνται και μερικώς απορροφώνται από τις επιφάνειες του σιγαστήρα με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η ένταση του θορύβου.



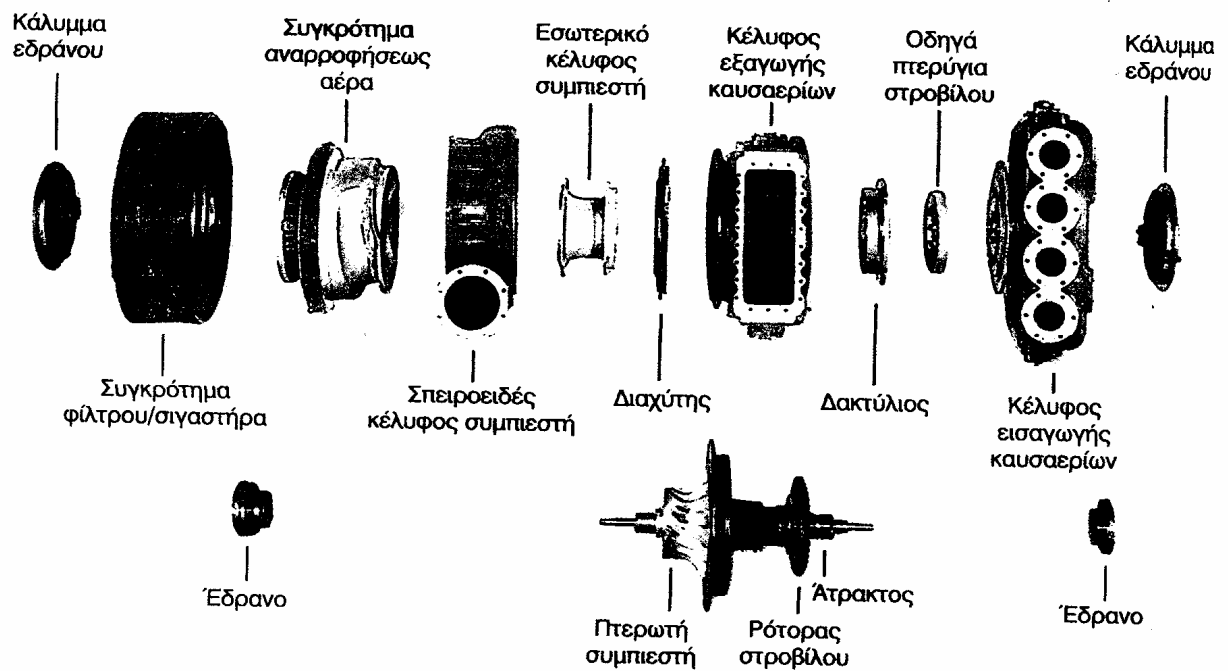
Εικόνα 2.10. Διάφορα κελύφη εισαγωγής για τα καυσαέρια του στροβίλου

Το φίλτρο (cleaner) κατακρατεί τη σκόνη του αέρα που εισέρχεται στον συμπιεστή και έτσι μειώνει τις επικαθήσεις στα πτερύγια του. Το φίλτρο μπορεί να καθαρίζεται χωρίς να απαιτείται η αφαίρεση του σιγαστήρα.



Εικόνα 2.11. Κέλυφος συμπιεστή μονάδας στροβιλοϋερίπληρωσης

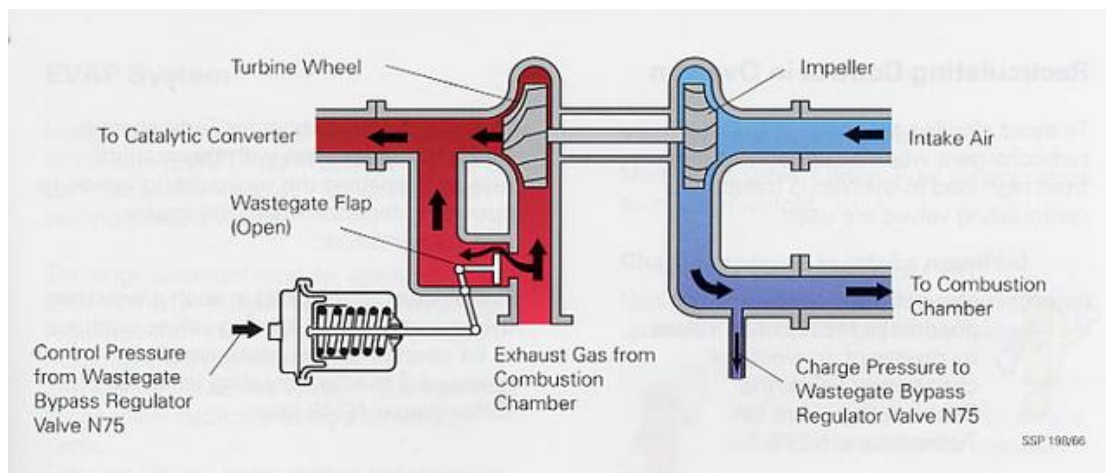
Τέλος, στην εικόνα 12, διακρίνονται όλα τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν έναν στροβιλοϋερίπληρωτή μιας ναυτικής πετρελαιομηχανής.



Εικόνα 2.12. Αποσυναρμολογημένος στροβιλοϋπερπληρωτής ναυτικής πετρελαιομηχανής

2.3.5 Πρόσθετα Εξαρτήματα

Παλιότερα σε πολλούς βενζινοκινητήρες, αλλά τελευταία και σε αρκετούς μεσαίους πετρελαιοκινητήρες χρησιμοποιείται μια εκτονωτική βαλβίδα (wastegate valve) η οποία παροχετεύει κάποια ποσότητα καυσαερίων για να προστατεύει τον σρόβιλο από υπερφόρτιση, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που ο κινητήρας λειτουργεί κοντά στο άνω όριο του φάσματος των περιστροφικών ταχυτήτων του. Η εκτονωτική βαλβίδα επιτρέπει και την χρησιμοποίηση ενός στροβιλοϋπερπληρωτή μικρότερου μεγέθους, γεγονός που επιδρά ευνοϊκά στην μείωση της υστέρησης απόκρισης.



Εικόνα 2.13. Λειτουργία της βαλβίδας διαφυγής.

Οι βαλβίδες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εξωτερικές (external) και τις εσωτερικές (internal).



Εικόνα 2.14. Εξωτερική wastegate



Εικόνα 2.15. Εσωτερική wastegate

Η βαλβίδα διαφυγής είναι η βαλβίδα που ρυθμίζει τις στροφές της τουρμπίνας και την πίεση που φαίνεται στην πολλαπλή εισαγωγή. Ο ρόλος της είναι να δίνει μια εναλλακτική, ευκολότερη δίοδο στα καυσαέρια να φύγουν στην εξάτμιση όταν η πίεση στην εισαγωγή ανέβει πολύ, χωρίς να περάσουν μέσα από τον στρόβιλο του τούρμπο. Έτσι πέφτουν οι στροφές και μειώνεται η πίεση.

Στις τουρμπίνες μικρού και μεσαίου μεγέθους (τις μικρότερες των 400 ίππων περίπου), υπάρχει μια τέτοια θυρίδα εσωτερικά, στο μαντέμι, που ελέγχεται από ένα εξωτερικό επενεργητή (wastegate actuator). Στα μεγάλα τούρμπο, λόγω του υπερβολικά μεγάλου μεγέθους του στρόβιλου, υπάρχει έλλειψη χώρου στο μαντέμι και γύρω του. Είναι αδύνατη η τοποθέτηση μιας εσωτερικής θυρίδας και έτσι, τοποθετείται εξωτερική

wastegate επάνω στην πολλαπλή εξαγωγή που συνδέεται με ξεχωριστό σωλήνα με την εξάτμιση.

Η λειτουργία της wastegate βασίζεται στον έλεγχο της ροής καυσαερίων μέσω της πίεσης που "βλέπει" το διάφραγμα της. Το ελατήριο προέντασης κρατάει την βαλβίδα κλειστή, όσο δεν υπάρχει πίεση στο κάτω μέρος του διαφράγματος. Υπάρχουν ελατήρια με διαφορετικές σκληρότητες, ανάλογα με την πίεση που θέλουμε να δουλεύει το τούρμπο. Όσο σκληρότερο το ελατήριο, τόσο δυσκολότερα ανοίγει η βαλβίδα, οπότε τόσο υψηλότερη θα είναι η πίεση λειτουργίας.

Μάλιστα, μέσω του συστήματος διαχείρισης του τούρμπο, μπορεί να εξασφαλιστεί πίεση στο διάφραγμα από την πλευρά του ελατηρίου, ώστε να υπάρχει βεβαιότητα ότι η βαλβίδα δεν θα ανοίγει από την πίεση των καυσαερίων, μέχρι να η πίεση να φτάσει στο επιθυμητό σημείο.

Κάθε βαλβίδα διαφυγής αποτελείται από:

1. το άνω καπάκι, που περιέχει το ελατήριο και δέχεται την εντολή πίεσης από το ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης τουρμπίνας,
2. το ελατήριο προέντασης της βαλβίδας,
3. το διάφραγμα, που είναι φτιαγμένο από πυρίμαχη σιλικόνη Nomex,
4. την βαλβίδα,
5. το κάτω καπάκι, που φέρει τις φλάντζες σύνδεσης με πολλαπλή εξαγωγή και εξάτμιση, και
6. την έδρα της βαλβίδας, που τοποθετείται επάνω σε ειδική φλάντζα της πολλαπλής εξαγωγής.

Ο λόγος που οι εξωτερικές wastegate έχουν απόλυτο έλεγχο της λειτουργίας του τούρμπο είναι ότι μπορεί να ελεγχτεί απόλυτα το ποσοστό διαφυγής των καυσαερίων. Χρησιμοποιώντας δύο εντολές πίεσης, μια για κάθε πλευρά του διαφράγματος, είναι δυνατόν να ανοιγοκλείσει κατά βούληση, μέσω ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης πίεσης, την wastegate.

Οι παραδοσιακές, εσωτερικές wastegate δεν μπορούν να ελεγχθούν τόσο εύκολα καθώς υπάρχει δυνατότητα ελέγχου μόνο για το άνοιγμά τους μέσω εντολής πίεσης. Επιπλέον, είναι φτιαγμένες έτσι ώστε να ανοίγουν μόνες τους αν ανέβει πολύ η πίεση των καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγή. Αυτό είναι μια δικλείδα ασφαλείας έκτακτης

ανάγκης που παρέχουν οι κατασκευαστές του τούρμπο, σε περίπτωση που κοπεί ή δεν λειτουργήσει το σωληνάκι πίεσης.

Μερικοί στροβιλοϋπερπληρωτές χρησιμοποιούν ένσφαιρα έδρανα κυλίσεως (ball roller bearings) αντί για υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης για την στήριξη του κοινού άξονα στροβίλου-συμπιεστή. Πρόκειται ωστόσο για εξαιρετικής ακρίβειας ρουλεμάν, κατασκευασμένα από ιδιαίτερα ανθεκτικά υλικά ώστε να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα υψηλά φορτία (μηχανικά και θερμικά) της μονάδας. Με την χρήση τέτοιων εδράνων, μειώνεται σημαντικά η τριβή κατά την περιστροφή του άξονα, ενώ επίσης επιτρέπεται η χρήση ελαφρύτερου άξονα, γεγονός που μειώνει περαιτέρω την αδράνεια και κατά συνέπεια την προαναφερθείσα υστέρηση απόκρισης.

Τελευταία σε πολλούς στροβίλους μονάδων υπερπλήρωσης χρησιμοποιούνται κεραμικά περύγια. Τέτοια περύγια είναι σημαντικά ελαφρότερα από τα αντίστοιχα χαλύβδινα και επιτρέπουν στον στρόβιλο να επιταχύνει πιο γρήγορα, συμβάλλοντας έτσι στην μείωση της αδράνειας και την αύξηση της απόδοσης της μονάδας υπερπλήρωσης.

Μερικές πετρελαιομηχανές χρησιμοποιούν δύο στροβιλοϋπερπληρωτές διαφορετικών μεγεθών. Η διάταξη αυτή ονομάζεται σταδιακή υπερπλήρωση (sequential turbocharging). Ο μικρότερος στροβιλοϋπερπληρωτής χρησιμοποιείται για την γρήγορη επιτάχυνση του κοινού άξονα, ενώ ο μεγαλύτερος αναλαμβάνει αργότερα σε υψηλότερες ταχύτητες της μηχανής για να δώσει μεγαλύτερη ώθηση στον συμπιεστή.

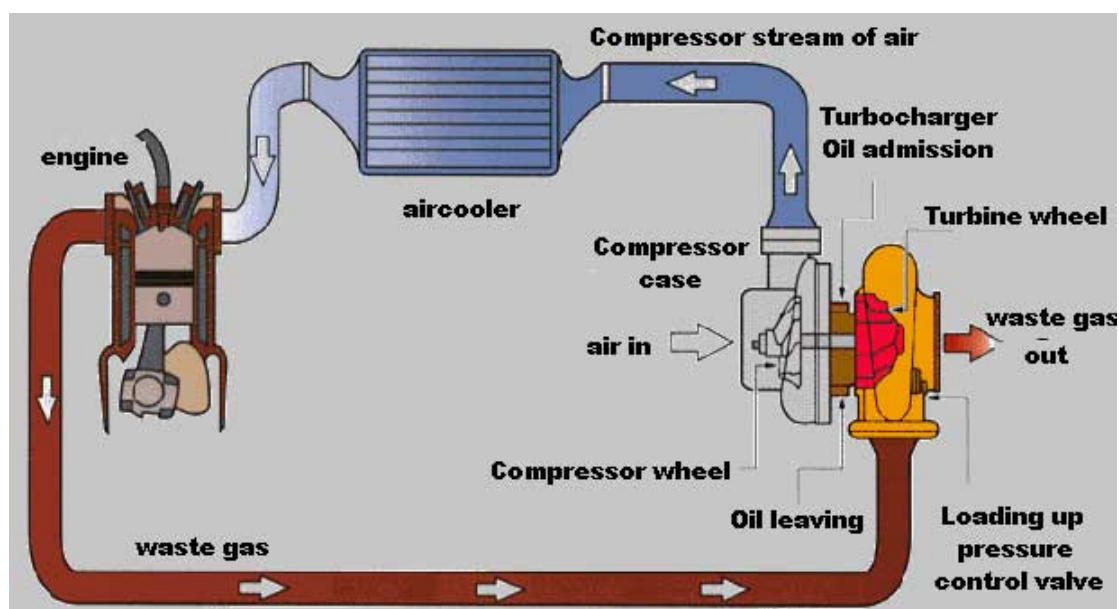
Τέλος, η συμπίεση του αέρα επιφέρει αναπόφευκτα την θέρμανση του. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε διαστολή και αυτή με τη σειρά της σε μείωση της πυκνότητας. Για να επιτευχθεί όμως ο στόχος της υπερπλήρωσης, δηλαδή η αύξηση της ισχύος της μηχανής, πρέπει να εισέρχονται μέσα στους κυλίνδρους της περισσότερα μόρια αέρα και όχι απλώς αέρας με υψηλότερη πίεση. Για να επανέλθει η πυκνότητα του αέρα σε υψηλά επίπεδα , σε πολλές πετρελαιομηχανές, μετά τον συμπιεστή τοποθετείται ένας εναλλάκτης θερμότητας αέρα-νερού, όπου ο αέρας περνάει ανάμεσα από αυλούς στο εσωτερικό των οποίων τρέχει νερό ως ψυκτικό μέσο. Συχνά, το εξάρτημα αυτό αναφέρεται σαν ενδιάμεσος ψυκτήρας (intercooler).

Ο ενδιάμεσος ψυκτήρας συντελεί στην αύξηση της ισχύος της μηχανής , ψύχοντας τον συμπιεσμένο αέρα αφού εξέλθει από το συμπιεστή και πριν εισέλθει στην πολλαπλή

εισαγωγής προς τους κυλίνδρους της μηχανής. Αυτό σημαίνει ότι, αν ο στροβιλοϋπερπληρωτής ανεβάσει την πίεση του αέρα εισαγωγής κατά 10 p.s.i ο ενδιάμεσος ψυκτήρας θα προσδώσει στην μηχανή αέρα με πίεση κατά 10 p.s.i υψηλότερη (από την ατμοσφαιρική) αλλά ψυχρό, επομένως πυκνότερο αέρα και έτσι η εισερχόμενη μάζα αέρα θα είναι μεγαλύτερη σχετικά με αυτήν του θερμού αέρα, όπως αυτός εξέρχεται από τον συμπιεστή. Περισσότερη εισερχόμενη μάζα αέρα επιτρέπει την είσοδο περισσότερου καυσίμου και επομένως την παραγωγή μεγαλύτερης μάζας καυσαερίων. Το τελευταίο γεγονός μεταφράζεται άμεσα σε αύξηση της παραγόμενης από την μηχανή ισχύος.

2.4 Λειτουργία

Ένας στροβιλοϋπερπληρωτής συνδέεται στην πολλαπλή εξαγωγής της μηχανής. Τα εξερχόμενα από τους κυλίνδρους καυσαέρια εκτονώνονται και περιστρέφουν τον στρόβιλο, ο οποίος λειτουργεί όπως ακριβώς μια μηχανή αεριοστρόβιλου (gas turbine). Ο στρόβιλος συνδέεται διαμέσου ενός κοινού άξονα με τον συμπιεστή, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του φίλτρου αέρα και της πολλαπλής εισαγωγής. Ο συμπιεστής ανεβάσει την πίεση του αέρα που οδηγείται προς τα έμβολα.

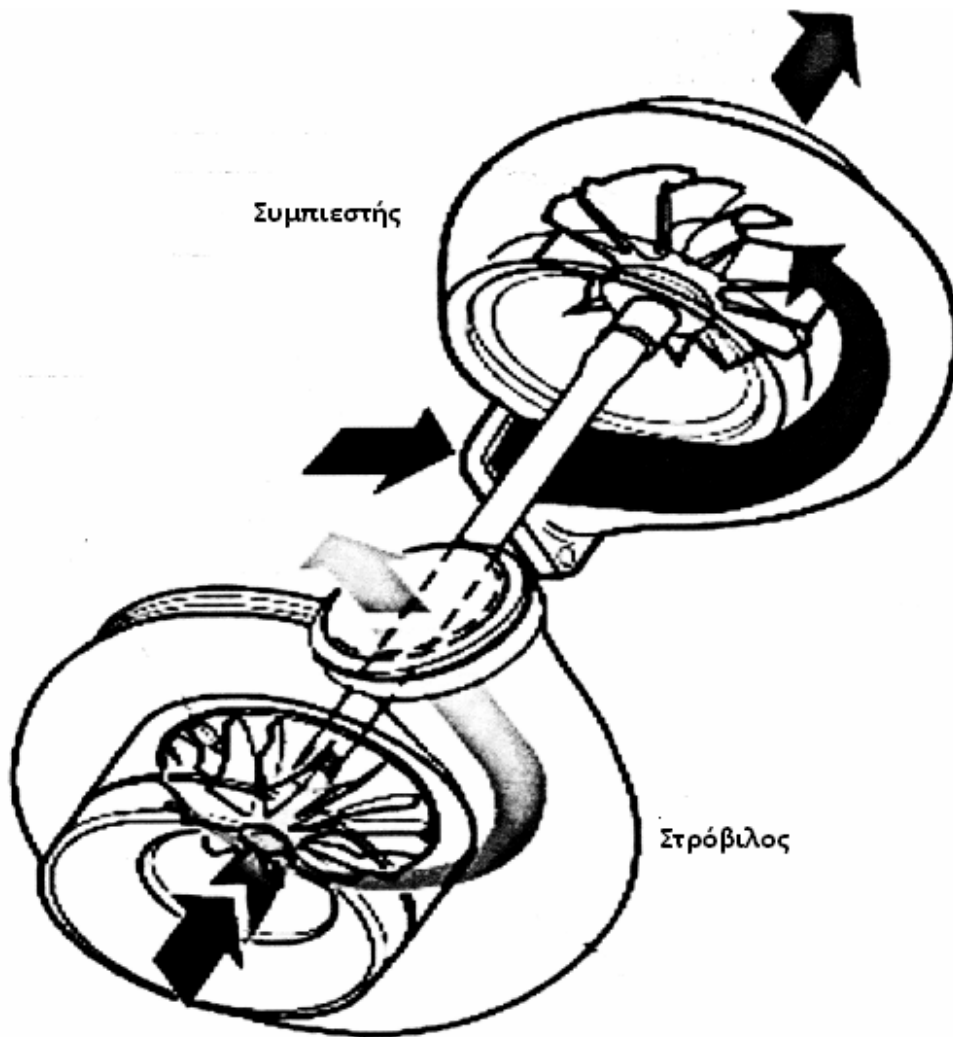


Εικόνα 2.16. Σύνδεση στροβιλοϋπερπληρωτή

Τα καυσαέρια αφού εξέλθουν από τους κυλίνδρους περνούν μέσα από τα πτερύγια του στρόβιλου, όπου εκτονώνονται περαιτέρω και τα αναγκάζουν να περιστραφούν.

Προφανώς, όσο μεγαλύτερη μάζα καυσαερίων περνάει ανάμεσα από τα πτερύγια στη μονάδα του χρόνου (παροχή) τόσο ταχύτερα αυτά περιστρέφονται.

Στο άλλο άκρο του κοινού άξονα συνδέεται ο συμπιεστής ο οποίος αναρροφά αέρα από το περιβάλλον και τον καταθλίβει προς τους κυλίνδρους της μηχανής. Ο συμπιεστής είναι συνήθως φυγοκεντρικού τύπου, δηλαδή αναρροφά αέρα από το κέντρο (βάση των πτερυγίων του) και τον προωθεί προς την περιφέρεια (άκρα των πτερυγίων του) καθώς περιστρέφεται.



Εικόνα 2.17. Αρχή λειτουργίας στροβιλοϋπερπληρωτή

Η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας στροβιλοϋπερπληρωτή φαίνεται εποπτικά στην εικόνα 21, όπου αναπαριστούνται τα δύο διακριτά της τμήματα: ο στρόβιλος και ο συμπλέκτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο εν λόγω σχήμα, τόσο ο στρόβιλος όσο και ο συμπιεστής είναι ακτινικής ροής (radial flow), μια διάταξη που συναντάται συνήθως σε περιπτώσεις υπερπλήρωσης βενζινοκινητήρων. Στις ναυτικές

πετρελαιομηχανές ωστόσο προτιμάται ο συνδυασμός στροβίλου ακτινικής ροής (axial flow) και συμπιεστή ακτινικής ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://en.turbolader.net/Technology/History.aspx>
- [2] Jay K. Miller, (2008). Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems. UK: Brookland Books Ltd.
- [3] Turbocharging 101: Some history and basics of turbocharging systems, 2005 .
Διαθέσιμο στην ηλ. διεύθυνση
<http://www.aviationpros.com/article/10385857/turbocharging-101-some-history-and-basics-of-turbocharging-systems>. Πρόσβαση στις 18/2/2012.
- [4] Ben Watson, (2008). Diesel Performance Handbook for Pickups and SUVs. USA: Motorbooks.
- [5] Malcolm Summers, (2007). ABB turbochargers – history and milestones
- [6] Licks Hallyes, (2011). Cons Of Turbo Charge. Διαθέσιμο στην ηλ. διεύθυνση
http://blogs.siliconindia.com/lickshallyes/Cons_Of_Turbo_Charge-bid-5b6H90FW5217958.html. Πρόσβαση στις 18/2/2012.
- [7] <http://www.peregrinesupercars.com/History.htm>
- [8] John C. Payne, (2005). Understanding Boat Diesel Engines. New York: Sheridan House Inc.
- [9] Ma Wen Jie. Is a Supercharger Better Than a Turbocharger?. Διαθέσιμο στην ηλ. διεύθυνση http://www.ehow.com/way_5296122_supercharger-better-turbocharger.html. Πρόσβαση στις 19/2/2012
- [10] R.K. Rajput, (2005). Internal Combustion Engines. Laxmi Publications
- [11] Victor Hillier, Peter Coombes, (2004). Fundamentals of motor vehicle technology. 5th edition. UK: Nelson Thornes Ltd
- [12] <http://ask.cars.com/2009/04/turbocharger-what-is-.html>
- [13] <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=95>

[14] Wilson, David Gordon and Theodosios Korakianitis, (1998). 'The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Turbines. 2nd ed., Prentice Hall.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 3 -
ABSTRACT	- 4 -
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	- 5 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ	- 6 -
1.1 Γενικά	- 6 -
1.2 Κατηγορίες Υπερπλήρωσης.....	- 7 -
1.3 Εφαρμογές Υπερπλήρωσης	- 9 -
1.4 Μέθοδοι Υπερπλήρωσης	- 10 -
1.4.1 Μέθοδοι Υπερπλήρωσης τετράχρονων και δίχρονων μηχανών	- 14 -
1.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα	- 15 -
2. TURBOCHARGERS	- 17 -
2.1 Θεωρητική προσέγγιση.....	- 17 -
2.2 Ιστορία	- 17 -
2.2 Μεγέθη Στροβιλοϋπερπληρωτών	- 22 -
2.2.1 Μικροί Στροβιλοϋπερπληρωτές.....	- 22 -
2.2.2 Μεσαίοι Στροβιλοϋπερπληρωτές.....	- 24 -
2.2.3 Μεγάλοι Στροβιλοϋπερπληρωτές	- 25 -
2.3 Ανατομία.....	- 28 -
2.3.1 Στρόβιλος	- 29 -
2.3.2 Συμπιεστής	- 31 -
2.3.3 Έδρανα	- 34 -
2.3.4 Κελύφη Συμπιεστή & Στροβίλου.....	- 36 -
2.3.5 Πρόσθετα Εξαρτήματα.....	- 39 -
2.4 Λειτουργία	- 43 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 46 -
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	- 48 -
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	- 50 -

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1. Supercharger	- 8 -
Εικόνα 1.2. Turbocharger	- 8 -
Εικόνα 1.3. Αύξηση bmer σε δίχρονους κινητήρες ντίζελ και λόγος πίεσης συμπιεστή.	- 11 -
Εικόνα 1.4 Υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας υψηλής πίεσεως	- 13 -
Εικόνα 2.1 Ο Ελβετός μηχανικός Alfred Buchi.	- 18 -
Εικόνα 2.2 Ο Sanford Moss της General Electric	- 19 -
Εικόνα 2.3 Δομή τυπικού στροβιλοϋπερπληρωτή ναυτικής πετρελαιομηχανής	- 26 -
Εικόνα 2.4 Πτερύγιο στροβίλου αξονικής ροής.....	- 27 -
Εικόνα 2.5 Ακτινικός στρόβιλος	- 29 -
Εικόνα 2.6 Αξονικός στρόβιλος	- 31 -
Εικόνα 2.7. Τυπικός υπερσυμπιεστής.	- 32 -
Εικόνα 2.8. Compressor Wheel	- 33 -
Εικόνα 2.9 Ανεξάρτητο σύστημα λιπάνσεως εδράνων σε στροβιλοϋπερπληρωτή ...	- 35 -
Εικόνα 2.10. Διάφορα κελύφη εισαγωγής για τα καυσαέρια του στροβίλου	- 37 -
Εικόνα 2.11. Κέλυφος συμπιεστή μονάδας στροβιλοϋεμπλήρωσης.....	- 38 -
Εικόνα 2.12. Αποσυναρμολογημένος στροβιλοϋπερπληρωτής ναυτικής πετρελαιομηχανής	- 39 -
Εικόνα 2.13. Λειτουργία της βαλβίδας διαφυγής.....	- 39 -
Εικόνα 2.14. Εξωτερική wastegate.....	- 40 -
Εικόνα 2.15. Εσωτερική wastegate	- 40 -
Εικόνα 2.16. Σύνδεση στροβιλοϋπερπληρωτή	- 43 -
Εικόνα 2.17. Αρχή λειτουργίας στροβιλοϋπερπληρωτή.....	- 44 -