

فناوری تولید موتورهای توربینی (قطعات دوار)

ترجمه و تألیف: مهدی تاجداری
سید غلامرضا میرحسینی
علی محمد عمویی

سرشناسه: تاجداری، مهدی. ۱۳۳۸ - عنوان و نام پدیدآور: فناوری و تولید موتورهای توربینی (قطعات دوار) / ترجمه و تالیف مهدی تاجداری، سید غلامرضا میر حسینی، علی محمد عمویی.
 مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۱. مشخصات ظاهری: ۲۷۲ ص.
 وضعیت فهرست‌نویسی: فیا. موضوع: هواپیماها-موتورها موضوع: هواپیماها-موتورهای توربینی پره‌دار
 موضوع: هواپیماها-تجهیزات برقی شناسه افزوده: میر حسینی، سید غلامرضا، ۱۳۵۲-
 شناسه افزوده: عمویی، علی محمد، ۱۳۵۲- شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 رده بندی کنگره: ۱۳۹۱ ۹ف۲/۱ TL۷۰ رده بندی دیویی: ۶۲۹/۱۳۴۳۵۲ رده بندی ملی: ۳۰۴۴۶۹۳



انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر



دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مجمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت

عنوان کتاب: فناوری و تولید موتورهای توربینی (قطعات دوار)
 ترجمه و تالیف: مهدی تاجداری، سید غلامرضا میر حسینی، علی محمد عمویی
 ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 طرح روی جلد: فریناز عسگری
 لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 صفحه‌آرایی رایانه‌ای: حسین میرزایی
 ویراستار ادبی: امین پژوهش جهرمی
 شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
 نوبت چاپ: اول، زمستان ۹۱
 قیمت: ۱۴۳۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-5665-41-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۶۶۵-۴۱-۳

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.
 آدرس: تهران، لویزانه، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز فناوری اطلاعات و خدمات علمی تهران
 مدیریت انتشارات، تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

فهرست مطالب

پیش گفتار.....	۱
مقدمه.....	۵
انواع موتورهای توربو جت.....	۷
انواع موتورهای جت.....	۸
موتورهای توربو فن.....	۹
موتورهای توربو جت.....	۱۰
موتورهای توربو پراپ.....	۱۲
موتورهای توربو شفت.....	۱۳
فصل اول: فناوری ساخت محور.....	۱۷
۱-۱. سازه، شرایط فنی و مواد اولیه.....	۱۹
۲-۱. فرآیند فناوری.....	۲۱
۱-۲-۱. نکات کلی.....	۲۱
۲-۲-۱. مراحل ماشین کاری محور.....	۲۷
۳-۱. انجام عملیات اولیه (پیشانی تراشی و مرغک زنی).....	۳۰
۴-۱. ماشین کاری سوراخ های محور.....	۳۱
۵-۱. داخل تراشی.....	۳۴
۶-۱. دور تراشی سطوح خارجی.....	۳۵
۷-۱. سنگ زنی محور.....	۳۸
۸-۱. ماشین کاری هزارخارها.....	۴۲
۹-۱. ماشین کاری سطوح کروی.....	۴۳
۱۰-۱. رزوه زنی محور.....	۴۴
۱۱-۱. عملیات نهایی (گردنهای صاف و هموار محور).....	۴۴
۱۲-۱. عملیات نهایی سوراخ ها.....	۴۶

۴۷	فصل دوم: فناوری ساخت دیسک
۴۹	۱-۲. سازه، ویژگی‌های فنی و مواد اولیه
۵۳	۲-۲. فرایند فناوری
۵۳	۱-۲-۲. نکات کلی
۵۷	۲-۲-۲. مراحل ماشین‌کاری دیسک
۵۹	۳-۲. انجام عملیات اولیه
۷۲	۴-۲. کنترل کیفی دیسک
۷۵	فصل سوم: فناوری ساخت پره‌ها توربین
۷۷	۱-۳. نکات و موارد عمومی
۸۴	۲-۳. ماشین‌کاری پره‌های فورج شده
۸۵	۱-۲-۳. ساخت پره‌های با ابعاد کوچک
۸۷	۳-۳. پره‌های ریختگی
۸۸	۱-۳-۳. ماشین‌کاری پره‌های ریختگی
۸۹	۲-۳-۳. ساخت دفלקتور
۹۲	۳-۳-۳. پره‌های چند کاناله با قابلیت خنک‌کاری
۹۴	۴-۳. ماشین‌کاری سطوح مبنا و ریشه توربین
۱۰۲	۵-۳. ماشین‌کاری ایرفویل پره‌های توربین به روش ویژه
۱۰۲	۱-۵-۳. ماشین‌کاری به روش الکتروشیمیایی
۱۰۴	۲-۵-۳. ماشین‌کاری به روش تخلیه الکتریکی
۱۰۶	۶-۳. ساخت پره‌های توربین نازل
۱۰۶	۱-۶-۳. ریخته‌گری قطعه کار پره‌های توربین نازل
۱۱۰	۲-۶-۳. ماشین‌کاری پره توربین نازل
۱۱۱	۷-۳. افزایش عمر و قابلیت اطمینان
۱۱۶	۸-۳. پوشش‌های محافظ در برابر حرارت
۱۱۹	۹-۳. ساخت پره‌های توربین تجهیزات توربوکمپ
۱۲۱	فصل چهارم: ساخت پره‌های کمپرسور
۱۲۳	۱-۴. سازه، شرایط فنی و مواد اولیه

۱۲۵	۱-۱-۴. شرایط فنی ایرفرویل پره
۱۲۵	۲-۱-۴. شرایط فنی ریشه پره
۱۲۸	۳-۱-۴. سایر شرایط فنی ساخت پره‌های کمپرسور
۱۳۰	۲-۲. روش ساخت پره‌های کمپرسورهای محوری
۱۳۵	۱-۲-۴. ویژگی‌های ماشین‌کاری پره‌های تیتانیومی کمپرسور
۱۳۶	۲-۲-۴. ماشین‌کاری ریشه پره
۱۴۱	۳-۲-۴. ماشین‌کاری پره‌های کمپرسور
۱۴۵	۴-۲-۴. ماشین‌کاری نهایی پره
۱۴۹	۳-۳-۴. کار سختی
۱۵۶	۴-۴. خودکارسازی تولید پره‌ها
۱۵۶	۱-۴-۴. خطوط خودکارسازی ماشین‌کاری پره‌های کمپرسور
۱۶۱	۵-۴. ماشین‌کاری ایرفرویل پره‌ها با ماشین‌های برنامه‌پذیر
۱۶۲	۶-۴. کنترل کیفی پره‌ها
۱۶۳	۱-۶-۴. بازرسی غیر مخرب
۱۶۷	فصل پنجم: فرایندهای فناوری ساخت پیش‌برنده
۱۶۹	۱-۵. سازه، شرایط فنی و مواد اولیه
۱۷۱	۲-۵. فرآیند فناوری
۱۷۶	۳-۵. مراحل ماشین‌کاری پیش‌برنده
۱۷۶	۱-۳-۵. پیش‌برنده‌های باز
۱۷۷	۲-۳-۵. پیش‌برنده‌های نیمه‌بسته
۱۷۷	۳-۳-۵. پیش‌برنده‌های بسته ریختگی
۱۷۸	۴-۳-۵. پیش‌برنده‌های بسته لحیم شده
۱۷۹	۴-۵. اجرای عملیات اولیه
۱۹۳	۵-۵. کنترل کیفی پیش‌برنده
۱۹۷	فصل ششم: روش‌های پیشرفته تولید قطعات به روش رایانه CAD/CAM و ساخت پیش‌برنده نمونه
۲۰۱	۱-۶. دستگاه‌های فرز CNC پنج محور هم‌زمان
۲۰۱	۱-۱-۶. پنج محور گهواره گردان

۲۰۲	 ۲-۱-۶. پنج محور گهواره و کله‌گی گردان
۲۰۲	 ۳-۱-۶. پنج محور کله‌گی گردان
۲۰۳	 ۲-۶. سطوح پیچیده
۲۰۴	 ۱-۲-۶. ماشین‌کاری سطوح پیچیده به روش ۳ محور هم‌زمان
۲۰۶	 ۳-۶. شکل برآمدگی‌ها
۲۰۸	 ۴-۶. روش‌های ماشین‌کاری پنج محور هم‌زمان
۲۰۸	 ۴-۶-۱. روش انحراف ابزار
۲۰۹	 ۲-۱-۶. ماشین‌کاری چند نقطه‌ای
۲۱۰	 ۲-۴-۶. روش محوره‌های اصلی
۲۱۲	 ۴-۴-۶. روش ماشین‌کاری ساچمه غلتان
۲۱۳	 ۵-۶. برخورد ها و فرورفتگی ابزار در کار
۲۱۷	 ۶-۶. شناسایی و بررسی روش‌های ایجاد مسیر ابزار
۲۱۷	 ۱-۶-۶. ماشین‌کاری با بغل ابزار
۲۱۸	 ۲-۶-۶. ماشین‌کاری به روش نقطه‌ای
۲۱۹	 ۳-۶-۶. ماشین‌کاری نواری
۲۲۲	 ۷-۶. ایجاد مسیر ابزار
۲۲۲	 ۸-۶. پرداخت سطوح پیچیده
۲۲۳	 ۹-۶. ماشین‌کاری با بغل ابزار
۲۲۴	 ۱۰-۶. ایجاد شیار
۲۲۵	 ۱۱-۶. سوراخ‌کاری
۲۲۵	 ۱۲-۶. ساخت پیش‌برنده نمونه
۲۲۷	 ۱-۱۲-۶. بررسی مدل هندسی
۲۲۹	 ۲-۱۲-۶. تهیه پیش‌فرم فرزکاری
۲۳۱	 ۳-۱۲-۶. ایجاد مسیر ابزار
۲۳۱	 ۴-۱۲-۶. خشن‌کاری پیش‌برنده نمونه
۲۳۳	 ۵-۱۲-۶. پرداخت پیش‌برنده نمونه
۲۳۶	 ۶-۱۲-۶. ایجاد مسیر ابزار با استفاده از نرم‌افزار
۲۴۳	 ۷-۱۲-۶. روش ماشین‌کاری Swarf

۲۴۵	۸-۱۲-۶ روش ماشین کاری Cut.....
۲۴۷	۹-۱۲-۶ پس پردازش مسیر ابزار.....
۲۴۸	۱۰-۱۲-۶ شبیه سازی مجازی مسیر ابزار.....
۲۵۰	۱۱-۱۲-۶ شبیه سازی فرز CNC پنج محور هم زمان (Hermle C 600).....
۲۵۴	۱۲-۱۲-۶ تعریف بلوک پیش فرم پیش برنده نمونه.....
۲۵۵	۱۳-۱۲-۶ تعریف ابزارهای برشی.....
۲۵۶	۱۴-۱۲-۶ فراخوانی مسیر ابزار برای نرم افزار.....
۲۵۸	۱۵-۱۲-۶ بررسی نتیجه شبیه سازی نرم افزاری مسیر ابزار.....
۲۵۹	۱۶-۱۲-۶ فرزکاری پیش برنده نمونه.....
۲۶۳	واژه نامه.....
۲۶۹	مراجع و منابع.....

پیش‌گفتار

با سپاس فراوان از درگاه ایزد منان و یاری او، نگارش کتاب فناوری تولید قطعات دوار موتورهای هوایی تقابلیم علاقه‌مندان، کارشناسان، دانشجویان و محققان رشته‌های صنایع هوایی در زمینه تولید موتور می‌شود.

با گسترش روزافزون فناوری تولید موتورهای هوایی، بهبود کارکرد موتورهای وسایل پرنده، قابلیت اطمینان، عمر کارکرد و همچنین هزینه‌های اقتصادی در تمامی مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری، ارتباط تنگاتنگی با کیفیت تهیه و تولید قطعات اصلی و حساس موتورهای هوایی دارد. بایداری تولید و ثبات آن نیز از شاخص‌های مهم دیگری است که می‌تواند در مراحل تولید و تهیه موتورهای هوایی نقش موثری داشته باشد.

دقت بالای قطعات بحرانی موتور از جمله قطعات مجموعه‌های کمپرسور، اتاقک احتراق و توربین و همچنین نیازمندی‌های آن‌ها در تامین کیفیت سطوح، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، تلرانس‌های ساخت و پارامترهای استحکامی و ارتعاشی، کارخانجات موتورسازی صنایع هوایی را از سایر صنایع ماشین‌سازی مستثنی می‌کند و به آن‌ها سطح فناوری بالاتری می‌بخشد.

در پی آن کارشناسان این صنعت نیز، باید دارای سطح مهارت، دانش و تجربه ویژه‌ای نسبت به سایر صنایع ساخت و تولید باشند، و این امر جز با کسب تجربه، تحقیق و ثبت آن و البته آموزش‌های دانشگاهی پایه و تخصصی محقق نمی‌شود.

بدیهی است پیش، تیزبینی و درایت مدیران این صنایع نیز باید در سطحی باشد تا بستر آموزش و پژوهش را در این حوزه برای کارشناسان خود فراهم آورند.

استفاده از مواد و فناوری‌های جدید متالورژی (که امروزه با پیشرفت دانش در شناخت و تولید آن‌ها ایجاد شده است) لزوم شناسایی و کاربرد آلیاژهای سبک، مقاوم به حرارت، مقاوم به سایش، مقاوم به خوردگی و در عین حال مستحکم و مقاوم برابر نیرو و ضربه را طلب می‌کند. هم‌چنین تهیه مواد و قطعات خام اولیه نیز در این صنعت از دقت تولید بالاتری برخوردار است، به گونه‌ای که در مقایسه با صنایع دیگر نیازهای فورج^۱، ریخته‌گری، نورد و... متفاوت بوده و به لحاظ متالورژیکی و ساختار دانه‌بندی، موقعیت قرارگیری الیاف و جهت آن‌ها در ماده خام و درجه تغییر شکل آن‌ها منجر به روش‌های پیشرفته‌تری از جمله فورج هم‌دم، ریخته‌گری دقیق، نورد سرد^۲ و... می‌شود. در زمینه کنترل و کیفیت ساختارهای فیزیکی و شیمیایی و یا کنترل دقت ابعادی و تلرانسی محصول نیز صنعت تولید موتورهای هوایی نیاز به دانش، تجهیزات و مراحل دقیقی توسعه یافته امروزی دارد.

در این کتاب برآنیم تا با توجه به تقسیم‌بندی موتورهای هوایی و مجموعه‌های حساس آن‌ها، فناوری تولید قطعات دوار از جمله پره‌ها، دیسک‌ها، محورها و پیش‌برنده‌های^۳ کمپرسور و توربین (که از اجزای پایه قطعات دوار محسوب می‌شوند) مورد بررسی قرار گیرد و مراحل مختلف روش‌های تولید، از قطعه خام اولیه تا مرحله نهایی و کنترل، تجهیزات و دستگاه‌های لازم، مواد اولیه و تلرانس‌های حدی و هندسی آن‌ها آورده شود. هم‌چنین با توجه به اهمیت روش‌های پیشرفته ساخت و تولید به کمک رایانه، ضمن معرفی روش‌های CAD/CAM، در فصل آخر به فرایند ساخت و مراحل مختلف آن برای یک پیش‌برنده نمونه پرداخته شده است.

1- Forging نمونه‌سازی از یک جسم

2- Cold Roll

3- Impeller

امید است این مجموعه که حاصل تجربیات نویسندگان در صنعت موتورسازی صنایع هوایی است بتواند گامی هر چند کوچک در بسترسازی اهداف آموزشی و تحقیقاتی دشته باشد.

در نهایت همواره راهنمایی و انتقاد را جزء نیازها دانسته و هر گونه انتقاد و اصلاح از طرف خوانندگان محترم، با کمال تشکر و امتنان مورد توجه و استفاده قرار خواهد گرفت. از خداوند متعال سعادت و توفیق پژوهندگان عرصه‌های علم و تحقیق را مسالت می‌نمایم.

مهدی تاجداری، سید غلامرضا میرحسینی، علی محمد عمویی

تأبستان ۹۱

مقدمه

انواع موتورهای توربوجت^۱

موتور جت، موتوری واکنشی است که وسیله پرنده را بر پایه قانون سوم نیوتن با سرعت به حرکت در می آورد. این تعریفی کلی از موتورهای جت است که دربر گیرنده توربوجت‌ها، توربوفن‌ها، توربوپراپ‌ها، توربوشفت‌ها^۲ و غیره است. در استفاده عمومی، موتور جت به موتور توربین گازی^۳ گفته می‌شود که از سرعت گازهای خروجی احتراق استفاده کرده و یا آن را تبدیل به نیروی مکانیکی می‌کند، در حالی که در ابتدای حرکت، توان خود را از یک تراکم‌کننده گردشی مانند کمپرسور می‌گیرد. این موتورها نخستین ساختاری بودند که در موتورهای جت به کار رفتند. با چرخش مداوم توربین و کمپرسور و بازده بالاتر، نیروی محرکه لازم تامین می‌شود.

موتورهای جت از سه بخش اصلی کمپرسور، اتاقک احتراق^۴ و توربین تشکیل شده‌اند. توربین در بخش انتهایی موتور قرار دارد و در زمان کارکرد، توان کمپرسور را از طریق یک یا چند محور تامین می‌کند.

در حقیقت تمام موتورهای جت توربین‌دار نوع پیشرفته‌تری از همان موتورهای توربین گازی هستند که در زمان‌های گذشته برای تولید برق استفاده می‌شدند.

-
- 1- Turbojet
 - 2- Turbofan
 - 3- TurboProp
 - 4- Turboshift
 - 5- Combustion chamber.

موتور جت هوایی با ساختار امروزی خود توسط فرانک ویتل^۱ انگلیسی اختراع شد و از این رو، وی را پدر موتور جت می‌نامند. ویتل در سال ۱۹۳۰ ایده موتور جت را به صورت انحصاری به ثبت رساند و در سال ۱۹۳۶ با تأسیس کارخانه خصوصی به نام پاور جت^۲ به ساخت و آزمایش اختراعش پرداخت. در سال ۱۹۳۷ نخستین موتور جت خود را روی زمین آزمایش کرد.

هم‌زمان با او آرخیل لولکی^۳ از اتحاد جماهیر شوروی در ۲۲ آوریل ۱۹۴۱ ایده موتور توربوجت دوکاناله یا توربوفن را به ثبت رساند. سپس در سال ۱۹۴۷ با همکاری دفتر طراحی سوخو^۴ نخستین نوع این موتور روی هواپیمای سوخوی ۱۱ به بهره‌برداری رسید.

پس از جنگ جهانی دوم کاربرد موتورهای جت توربینی برای نیروی پشرانش انواع هواپیماهای نظامی و غیرنظامی رواج یافت تا امروزه که با پیشرفت دانش طراحی و تولید موتور و استفاده از مواد جدید در صنعت هوایی جهان، موتورهای توربینی هوایی، ۴ نسل مختلف خود را طی کرده و در آغاز نسل پنجم فناوری طراحی و ساخت قرار گرفته‌اند.

انواع موتورهای جت

موتورهای جت به چند دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱. توربوفن؛
۲. توربوجت؛
۳. توربوپراپ؛
۴. توربوشفت.

1- Frank Whittle

2 -Power jet.

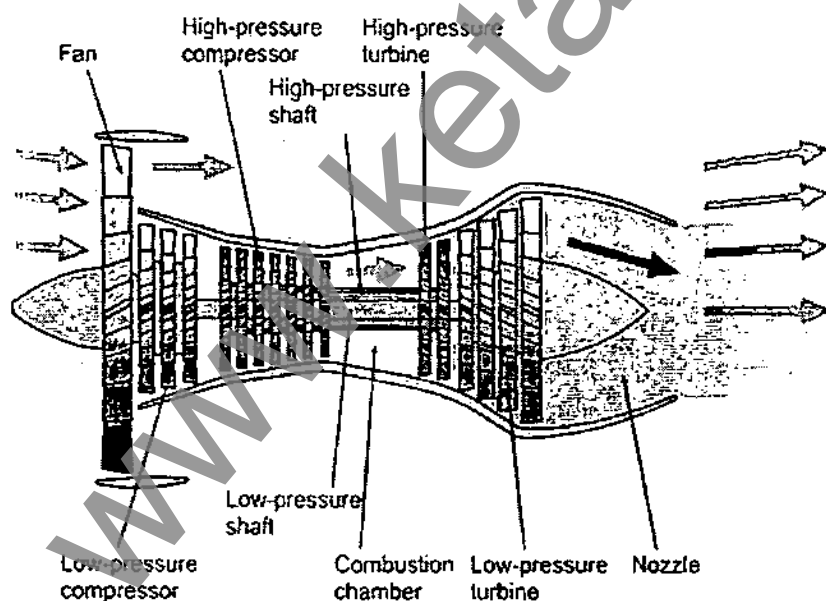
3- Arkhir Lolki

4- Sukhoi

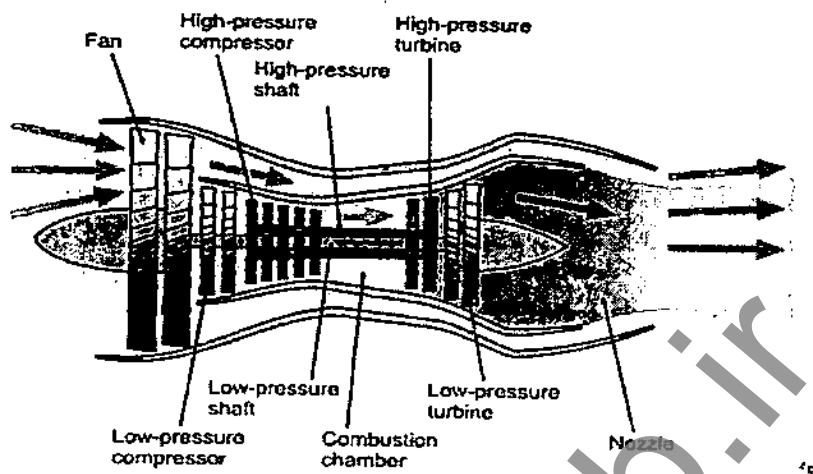
موتورهای توربوفن

موتورهای توربوفن با بازده زیاد، مقداری از هوا را به طریق کنار گذر عبور داده که در نهایت به گازهای خروجی داغ پیوسته و نیروی پشرانش را افزایش می‌دهد و به همین علت هم در بسیاری از هواپیماهای مسافربری و ترابری در سرعت‌های زیرصوت استفاده می‌شود.

در موتورهای توربوفن، ابتدا هوا فشرده شده، سپس وارد اتاقک احتراق می‌شود و پس از احتراق از طریق شیبوره یا نازل خروجی خارج شده و در طی این فرایند نیروی پشرانش لازم را برای رانش هواپیما به جلو تامین می‌کند.



شکل ۱: نمایی از مقطع موتور توربوفن با داکت^۱ کوتاه



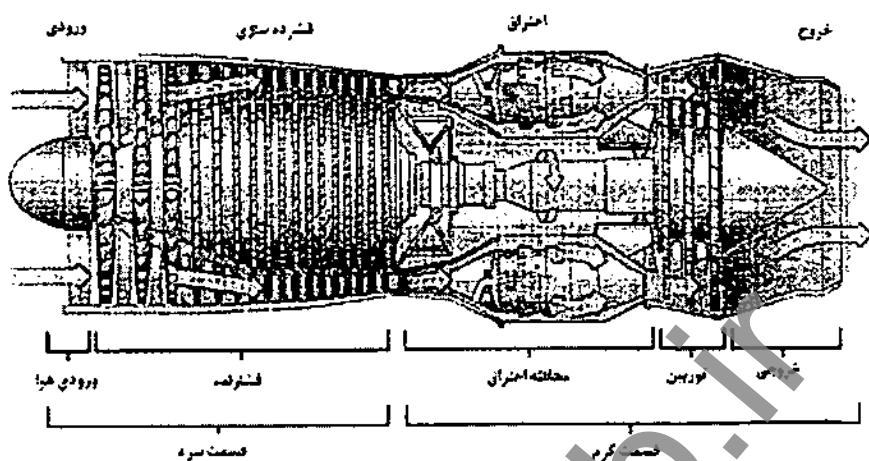
شکل ۱-۱ نمای از مقطع موتور توربوجت با داکت بلند

موتورهای توربوجت

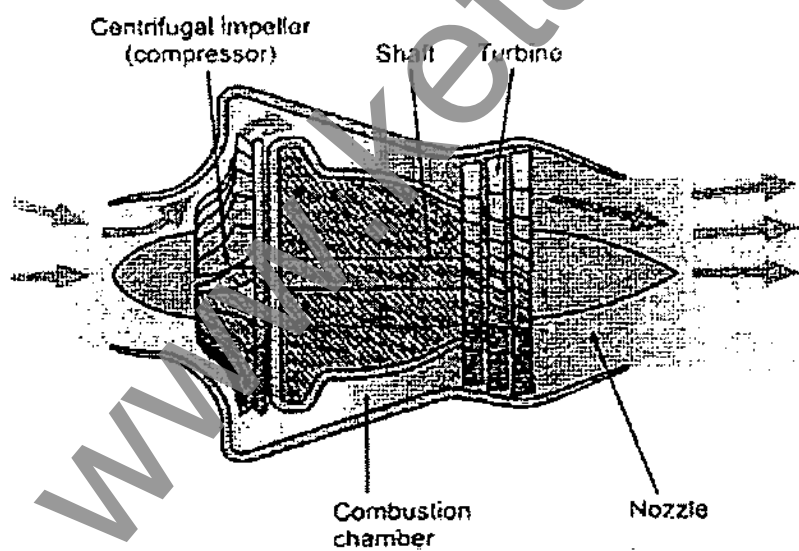
موتورهای توربوجت، بر نیروی تولیدی از گازهای خروجی اتکا داشته و بیش‌تر در هواپیماهایی که با سرعت‌های مافوق صوت حرکت می‌کنند، کاربرد دارند. در موتورهای توربوجت، هوا وارد کمپرسور شده و متراکم می‌شود ولی چون این هوا با سرعت به نسبت زیادی وارد موتور شده است برای احتراق مناسب نیست و بیش‌تر سوخت مصرف شده بدون اشتعال هدر می‌رود. به همین دلیل هوا به پخش‌کننده^۱ فرستاده می‌شود تا از سرعت آن کاسته شود. در پخش‌کننده با کاهش سرعت هوا بر دما و فشار آن افزوده می‌شود، سپس هوای آماده احتراق به اتاقک احتراق فرستاده شده و در آن‌جا با سوخت مخلوط شده و احتراق انجام می‌گیرد. بخشی از نیروی حاصله از این انفجار صرف گرداندن توربین شده و مابقی برای تولید رانش به کار می‌رود. گاهی در هواپیماهای توربوجت پس از شیپوره خروجی یا نازل، بخشی به نام پس‌سوز^۲ قرار می‌دهند که بر نیروی پیش‌رانش می‌افزاید.

1- Diffuser

2- After Burner



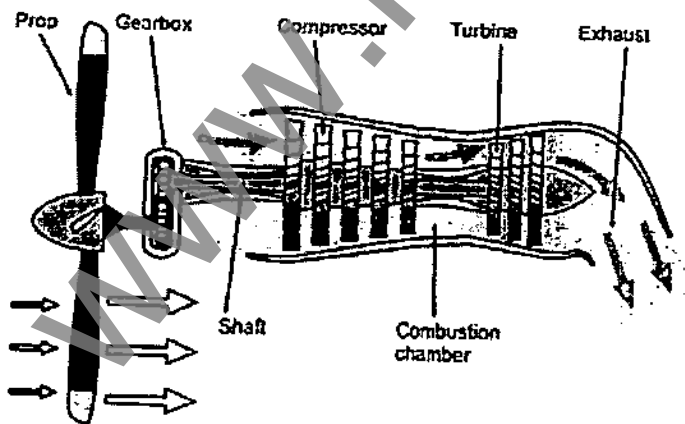
شکل III: نمایی از مقطع موتور توربو جت



شکل IV: نمایی از مقطع موتور با کمپرسور گریز از مرکز^۱

موتورهای توربوپراپ

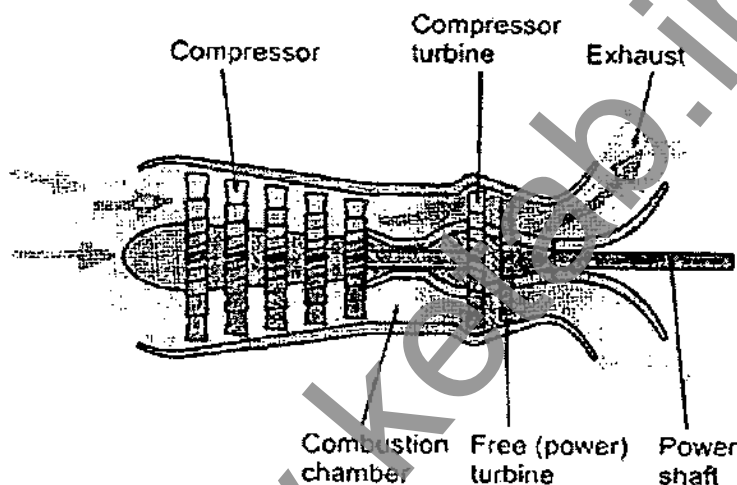
کارایی موتور توربوپراپ در سرعت‌های کم بیش‌تر از موتور توربوجت است و به همین دلیل از این موتورها عمدتاً در هواپیماهای ترابری و حمل و نقل نظامی استفاده می‌شود. توربین در این موتورها کمپرسور و فن را به حرکت درمی‌آورد؛ از این‌رو پروانه‌های بزرگ، انرژی گازهای خروجی از موتور را برای به حرکت درآوردن خود کاهش داده و نیروی جلو برندگی حاصل از جت خروجی موتور کاهش می‌یابد. نهایت توازن انرژی این است که به جای پروانه و مجرای آن ملخ قرار می‌گیرد و تمام قدرت موتور صرف گرداندن ملخ می‌شود. این قبیل موتورها را توربوپراپ می‌نامند. از آن رو که توربوجت‌ها دارای دور موتور بالایی هستند، گردش محور اصلی باید پیش از انتقال به ملخ از جعبه دنده‌های کاهنده عبور کند و به ملخ برسد. در این گونه موتورها بیش‌تر نیروی جلو برنده توسط ملخ تامین می‌شود و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از کل نیروی جلو برنده نیز از جت خروجی موتور به دست می‌آید.



شکل V: نمایی از مقطع موتور توربو پراپ

موتورهای توربوشفت

موتورهای توربوشفت نیز از ساختار مشابه موتورهای توربوپراپ برخوردار بوده و تفاوت اصلی آن‌ها در انتقال محور خروجی از موتور است. محور خروجی با استفاده از جعبه دنده‌های کاهنده دور، توان خود را به ملخ بالگرد منتقل می‌کند و به این منظور برای بالگردهای مسافری، ترابری و یا نظامی استفاده می‌شود.



شکل ۱۷: نمایی از مقطع موتور توربوشفت

مهم‌ترین اجزای دوار موتورهای هوایی به شرح زیر است:

- ۱- محورها (کمپرسور - توربین)؛
- ۲- دیسک (کمپرسور - توربین)؛
- ۳- پره‌های کمپرسور (کمپرسورهای محوری)؛
- ۴- پره‌های توربین؛
- ۵- پیش‌برنده (کمپرسورهای گریز از مرکز).

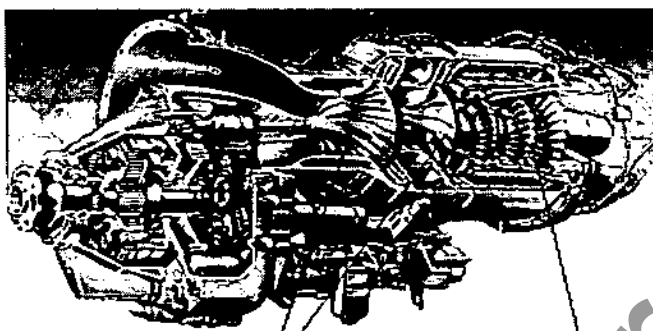


شکل VI: مقطعی از نمای برش خورده دیسک و پره های توربین



توربین شفت اصلی پره های کمپرسور محوری

شکل VII: اجزای یک موتور توربوفاون با کمپرسور محوری



ایمپلرهای کمپرسور گریز از پره های توربین

شکل VIII: اجزای یک موتور توربوپراپ با کمپرسور گریز از مرکز

هر چند می توان تقسیم بندی های دیگری نیز برای موتورهای هوایی قائل شد، اما ساختار همگی آنها از لحاظ کارکرد و اجزای اصلی کمابیش یکسان بوده و اجزای دوار مشترک آنها عموماً شامل پره ها، دسک ها و محورها بوده و از حساسیت بالایی نسبت به سایر قطعات برخوردار هستند. به همین دلیل در ادامه کتاب در فصل های مختلف، قطعات دوار موتورهای هوایی - توربینی را مورد ارزیابی فناوریانه قرار داده و جداگانه، فناوری و شرایط ساخت و تولید هر قطعه بر پایه نوع کارکرد، ماده اولیه و کنترل آنها تشریح می شود. لازم به ذکر است با توجه به تمرکز محتویات این کتاب بر موارد فناوری ساخت، فرض بر این است که خواننده با مفاهیم موتورهای هوایی توربینی و کارکرد هر مجموعه و نیز قطعات دوار آن آشنایی داشته و به نیازمندی های فنی ساخت و تولید این دسته از قطعات آگاهی دارد.

از آنجا که در بخش های این کتاب از کلاس دقت ماشین کاری سطوح برای قطعات مختلف سخن به میان آمده است، از این رو در جدول زیر تقسیم بندی استاندارد ISO به منظور تعیین کلاس دقت و ناصافی سطح مجاز در ماشین کاری آورده شده است. از این رو در هر کجا از فصل های مختلف (که به کلاس دقت اشاره می شود) می توان بر پایه جدول ۱ میزان ناصافی سطح را تعیین کرد.

جدول ۱: نسبت مقدار ناصافی سطح با کلاس دقت ماشین‌کاری

کلاس دقت	پارامترهای ناصافی سطح	
	$R_a (\mu m)$	$R_z (\mu m)$
۱	—	۱۶۰-۳۲۰
۲	—	۸۰-۱۶۰
۳	—	۴۰-۸۰
۴	—	۲۰-۴۰
۵	—	۱۰-۲۰
۶	۲۵.۱-۵.۲	—
۷	۶۳.۰-۲۵.۱	—
۸	۳۲.۰-۶۳.۰	—
۹	۱۶.۰-۳۲.۰	—
۱۰	۰.۸-۱۶.۰	—
۱۱	۰.۴-۰.۸	—
۱۲	۰.۲-۰.۴	—
۱۳	—	۰.۵-۱.۰
۱۴	—	۰.۲۵-۰.۵

در جدول فوق R_a متوسط انحراف از خط مختصات میانی سطح و R_z ارتفاع غیریکنواختی در حداقل ده نقطه از سطح است. استفاده از میله‌های مذکور در نقشه‌های ساخت و طراحی قطعات بسیار رایج است.