

بسم ... الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

پردیس خوارزمی

رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید
پایان نامه کارشناسی ارشد

ساخت پوسته سوپرآلیاژ پایه نیکل یک شمع موتور هوایی به روش ریخته گری دقیق و
ماشینکاری

نگارنده : سید امیرحسین علوی

استاد راهنما

دکتر سیدهادی قادری

شهریور ۱۳۹۵

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای..... به شماره دانشجویی..... رشته..... گرایش..... تحت عنوان..... که در تاریخ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه :: امتیاز ..) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹)
 ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
 ۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)
 ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)
 ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول			
۲- استادراهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی			
۵- استاد ممتحن اول			
۶- استاد ممتحن دوم			

رئیس دانشکده:

تقدیم‌نامه

تقدیم به

مادر مهربان

که وجودشان برایم سراسر مهر است

آنانکه توانش رفت تا به توانایی برسم و مویش سپیدی گرفت تا رویم سپید بماند،

آنانکه فروغ نگاهش، گرمی‌دستانش و روشنی رویش سرمایه‌های جاودانی

زندگی ام هست

سپاس‌گزاری

خدای بزرگ و منان را شاکرم که به من اراده، توانایی و انگیزه عطا فرمود تا بتوانم این پروژه را با موفقیت به اتمام برسانم.

بر خود لازم می‌دانم از حمایت‌ها، زحمات و راهنمایی‌های آقای دکتر سیدهادی قادری، استاد راهنمای اینجانب صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین شایسته است مراتب قدردانی و سپاسگذاری خودم را نسبت به آقای مهندس مرتضی یزدان شناس، آقای مهندس سیامک نجفی نیا و به خاطر مساعدت‌های بی دریغ شان ابراز کنم.

در نهایت برای پدر مرحومم طلب مغفرت و آمرزش و برای مادر عزیزم که تمام موفقیت‌هایم در زندگی را مدیون و مرهونش هستم و بدون حمایت‌های دلسوزانه او سطری از این پایان نامه نگاشته نمی‌شد، آرزوی سلامتی و طول عمر دارم.

تعهد نامه

اینجانب سید امیرحسین علوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی پردیس خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ساخت پوسته سوپرآلیاژ پایه نیکل یک شمع موتور هوایی به روش ریخته گری دقیق و ماشینکاری تحت راهنمایی دکتر سیدهادی قادری متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

شمع ابزاری برای انتقال جرقه‌های متناوب برق به محفظه احتراق است. در موتورهای جت شروع احتراق و شعله به وسیله شمع انجام می‌شود. شمع موتور هوایی از قسمت اصلی شامل بدنه فلزی، عایق سرامیکی، الکترود مرکزی و چسب هوا بند تشکیل شده است. در این پایان‌نامه به ساخت پوسته فلزی شمع موتور جت 17-79J پرداخته شده است. ابتدا نمونه‌ای از شمع مورد نظر تهیه شده، با دمنواژ کردن قطعات آن و اندازه‌گیری ابعادی، نقشه پوسته تهیه شده است. همچنین نمونه‌ای از پوسته برای شناسایی به آزمایشگاه متالورژی و مواد ارسال شد. با آنالیز طیف سنجی مشخص شد که پوسته از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۶۰۰ است. در تهیه نقشه قطعه سعی شده است با توجه به نتایج مدل‌سازی انجام شده در نرم افزار آباکوس و استانداردهای مربوط به شمع هوایی، تلورانس‌ها و کیفیت سطح قطعه در نقشه ساخت اعمال شود. ماده خام اینکونل ۶۰۰ به صورت شفت اکستروژن شده تهیه شد. با توجه به هندسه قطعه، تعداد محدود و امکانات موجود برای ساخت فرآیندهای تراشکاری، فرزکاری و اسپارک برای ساخت قطعه انتخاب شده است. پس از ساخت قطعه، تست‌های مربوط به پوسته انجام شده و مواردی مانند تست چشمی، دقت ابعادی و صافی سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: شمع، سوپرآلیاژ، ماشینکاری، اینکونل، هستلوی

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱- موتور جت	۲
۱-۱-۱ موتورهای توربوجت.....	۲
۲-۱- اجزای تشکیل دهنده موتور جت	۳
۱-۲-۱ ورودی	۴
۲-۲-۱ متراکم کننده	۴
۳-۲-۱ محفظه احتراق	۴
۴-۲-۱ توربین	۶
۵-۲-۱ نازل یا خروجی	۶
۳-۱- سیستم احتراق	۶
۱-۳-۱ شمع	۶
۲-۳-۱ اجزای تشکیل دهنده یک شمع	۷
۳-۳-۱ بدنه فلزی	۷
۴-۳-۱ عایق شمع	۷
۵-۳-۱ الکتروود	۸
۴-۱- واحد اشتعال	۸
۱-۴-۱ احتراق دوباره.....	۱۲
۲-۴-۱ احتراق جرقه ای	۱۳
۳-۴-۱ واحد احتراق انرژی بالا	۱۴
۴-۴-۱ شمع تخلیه سطحی	۱۵
۵-۴-۱ عملکرد شمع	۱۶
۶-۴-۱ طراحی شمع	۱۷
۷-۴-۱ عمر شمع	۱۸
۸-۴-۱ شکلهای دیگری از شمع	۱۹
۹-۴-۱ اضافه کردن گاز	۲۳
۱۰-۴-۱ تزریق اکسیژن	۲۳
۱۱-۴-۱ عوامل موثر بر عملکرد سیستم شمع	۲۴
۱۲-۴-۱ سیستم شمع	۲۴
۱۳-۴-۱ انرژی جرقه	۲۴
۱۴-۴-۱ مدت زمان جرقه	۲۴

- ۱-۴-۱۵ نرخ جرقه زنی ۲۵
- ۱-۴-۱۶ محل شمع ۲۶
- ۱-۵- اهداف پژوهش و مروری بر فصل‌های پایان نامه ۲۷

فصل ۲ سوپرآلیاژها و روش‌های شکل‌دهی آن ۲۹

- ۱-۲- سوپرآلیاژ ۳۰
- ۱-۱-۲ ویژگی‌ها و خواص سوپرآلیاژها ۳۰
- ۲-۱-۲ خواص سوپرآلیاژها ۳۲
- ۲-۲- سوپرآلیاژهای پایه آهن ۳۲
- ۳-۲- سوپرآلیاژهای پایه کبالت ۳۳
- ۴-۲- سوپرآلیاژ پایه نیکل ۳۴
- ۱-۴-۲ بررسی ریز ساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل ۳۴
- ۲-۴-۲ سوپرآلیاژ هستلوی ایکس ۳۵
- ۳-۴-۲ سوپرآلیاژهای اینکونل ۳۶
- ۴-۴-۲ خواص اینکونل ۳۷
- ۵-۴-۲ کاربرد اینکونل ۳۷
- ۶-۴-۲ آلیاژهای اینکونل ۳۸
- ۷-۴-۲ اینکونل ۶۰۰ ۳۸
- ۸-۴-۲ مشخصات فنی ۳۹
- ۹-۴-۲ نام‌های مرسوم تجاری ۳۹
- ۱۰-۴-۲ ویژگی‌ها ۳۹
- ۵-۲- ساخت و تولید قطعات سوپرآلیاژی ۴۰
- ۶-۲- روش‌های شکل‌دهی قطعات سوپرآلیاژ ۴۰
- ۱-۶-۲ ریخته‌گری دقیق ۴۰
- ۲-۶-۲ آهنگری سوپرآلیاژها ۴۲
- ۳-۶-۲ متالورژی پودر سوپرآلیاژها ۴۲
- ۴-۶-۲ ماشینکاری سوپرآلیاژها ۴۴
- ۷-۲- ماشینکاری پوسته شمع موتور هوایی ۴۶

فصل ۳ فرآیند ساخت پوسته شمع ۴۷

- ۱-۳- شمع اصلی موتور هوایی J79-17 ۴۸
- ۲-۳- دمونتاز قطعات شمع ۴۹
- ۳-۳- مدلسازی شمع تحت بار حرارتی ۵۱

۵۴	۴-۳- تهیه نقشه پوسته فلزی
۵۶	۵-۳- آنالیز شیمیایی قطعه
۵۷	۶-۳- نتایج آنالیز
۵۹	۷-۳- تهیه ماده خام
۶۲	۸-۳- ساخت پوسته فلزی
۶۶	۹-۳- مراحل ساخت قطعه

فصل ۴ نتایج و بحث ۷۱

۷۲	۱-۴- الزامات فیزیکی
۷۲	۲-۴- کیفیت سطح
۷۲	۱-۲-۴- تکنیک‌های اندازه گیری زبری سطح
۷۵	۳-۴- آزمایش‌های چگالی و سختی سنجی
۷۵	۱-۳-۴- آزمایش چگالی پوسته شمع اصلی
۷۶	۲-۳-۴- آزمایش سختی سنجی پوسته شمع اصلی
۷۸	۳-۳-۴- چگالی و سختی شفت اینکونل ۶۰۰

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۹

۸۰	۱-۵- نتیجه گیری
۸۱	۲-۵- پیشنهادها
۸۲	پیوست ۱

۹۳	پیوست ۲
----	---------

۹۷	منبع‌ها
----	---------

۹۹	Abstract
----	----------

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موتور جت..... ۳
- شکل ۲-۱- قسمت‌های مختلف موتور جت..... ۳
- شکل ۳-۱- محفظه احتراق..... ۵
- شکل ۴-۱- شمع موتور هوایی..... ۷
- شکل ۵-۱- استارت برخوردی هوا..... ۹
- شکل ۶-۱- استارت توربین گازی..... ۹
- شکل ۷-۱- یک واحد اشتعال از نوع لرزاننده..... ۱۰
- شکل ۸-۱- یک واحد اشتعال ترانزیستوری..... ۱۱
- شکل ۹-۱- یک واحد احتراق جریان متناوب..... ۱۱
- شکل ۱۰-۱- نمونه شمع احتراق..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱- یک نمونه حلقه از احتراق مجدد پرواز..... ۱۳
- شکل ۱۲-۱- واحد اشتعال انرژی بالای استاندارد..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱- جرقه زن تخلیه سطحی..... ۱۶
- شکل ۱۴-۱- دو نوع پایه‌ای از جرقه زن‌های تخلیه سطحی..... ۱۷
- شکل ۱۵-۱- دیاگرام شماتیک از تجهیزات آزمون شمع..... ۲۵
- شکل ۱-۲- ریز ساختار یک سوپرآلیاژ پایه نیکل..... ۳۵
- شکل ۲-۲- مراحل فرآیند تولید دیسک کمپرسور توربین به روش متالورژی پودر و کاهش وزن اولیه در این روش در مقایسه با روش تولید سنتی..... ۴۴
- شکل ۳-۱- فرآیند ساخته پوسته شمع..... ۴۸
- شکل ۲-۳- شمع اصلی موتور جت فانتوم J79-17..... ۴۸
- شکل ۳-۳- شمع محفظه‌ی احتراق و اجزای آن..... ۴۹
- شکل ۴-۳- ذوب کردن چسب درون شمع با استفاده از کوره..... ۵۰
- شکل ۵-۳- سرامیک پایین شمع موتو جت J85 و چسب نگهدارنده آن..... ۵۰
- شکل ۶-۳- برش پوسته شمع موتو جت J85 با استفاده از فرز حکاکی..... ۵۰

- شکل ۳-۷- شمع برش خورده و محل قرارگیری سرامیک‌ها..... ۵۱
- شکل ۳-۸- توزیع حرارت در شمع..... ۵۲
- شکل ۳-۹- فلاکس حرارتی پوسته شمع..... ۵۲
- شکل ۳-۱۰- تغییرات دما پوسته شمع..... ۵۳
- شکل ۳-۱۱- تنش میزز..... ۵۳
- شکل ۳-۱۲- تغییرات قطر در جهت شعاع..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳- قطعه‌ی ریخته‌گری شده با جرم تقریبی ۸۰ گرم..... ۵۵
- شکل ۳-۱۴- قطعه‌ی ماشینکاری شده با جرم تقریبی ۶۰ گرم..... ۵۵
- شکل ۳-۱۶- دستگاه آنالیز فلزات-کوانتومتری مدل SOLARIS CCD Plus..... ۵۶
- شکل ۳-۱۷- قطعات خام تهیه شده الف: اینکونل ۶۰۰- ب: هستلوی X..... ۵۹
- شکل ۳-۱۸- خار روی پوسته..... ۶۲
- شکل ۳-۱۹- محدوده ماشینکاری پر سرعت برای مواد مختلف..... ۶۴
- شکل ۳-۲۰- الکتروود مسی جهت ماشینکاری قسمت داخلی قطعه..... ۶۷
- شکل ۳-۲۱- سوراخکاری قطعه با دستگاه سوپر دریل ۶۷
- شکل ۳-۲۲- الکتروود مسی جهت ماشینکاری خار روی پوسته ۶۸
- شکل ۳-۲۳- ماشین اسپارک بهروز..... ۶۹
- شکل ۳-۲۴- پوسته فلزی شمع ساخته شده ۷۰
- شکل ۳-۲۵- الکتروود ساخته شده ۷۰
- شکل ۴-۱- تکنیک‌های اندازه گیری زبری سطح..... ۷۳
- شکل ۴-۲- الف: وزن پوسته در آب - ب: وزن پوسته بیرون آب ۷۵
- شکل ۴-۳- الف: ناحیه گرم - ب: ناحیه سرد..... ۷۶
- شکل ۴-۴- تست ویکرز ناحیه گرم پوسته ۷۷
- شکل ۴-۵- تست ویکرز ناحیه سرد پوسته..... ۷۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱- ترکیب شیمیایی اینکونل.....	۳۷
جدول ۱-۳- استاندارد تهیه نقشه.....	۵۵
جدول ۲-۳- عناصر تشکیل دهنده پوسته بیرونی از نوع اینکونل ۶۰۰.....	۵۷
جدول ۳-۳- عناصر تشکیل دهنده الکتروود مرکزی از نوع هستلوی ایکس.....	۵۸
جدول ۴-۳- آنالیز عناصر تشکیل دهنده شفت اینکونل ۶۰۰.....	۶۰
جدول ۵-۳- آنالیز عناصر تشکیل دهنده ورق هستلوی X.....	۶۱
جدول ۱-۴- صافی سطح.....	۷۴
جدول ۲-۴- نتایج چگالی پوسته.....	۷۵
جدول ۳-۴- نتایج تست ویکرز بر روی ناحیه گرم پوسته.....	۷۷
جدول ۴-۴- نتایج تست ویکرز بر روی ناحیه سرد پوست.....	۷۷
جدول ۵-۴- میزان سختی شفت اینکونل با توجه به اطلاعات سازنده.....	۷۸

فصل ۱ مقدمه

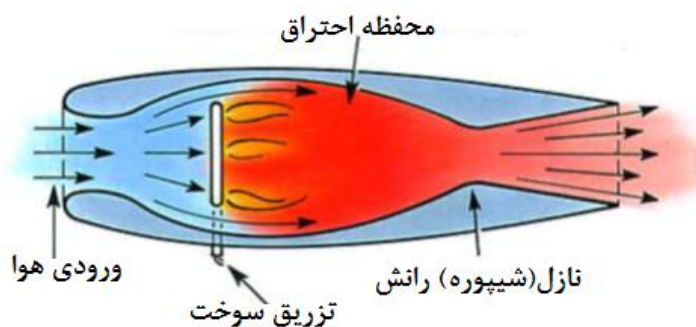
۱-۱- موتور جت

موتور جت یا موتور شارشی نوعی موتور است که از شتاب دادن و تخلیه شاره برای ایجاد پیش رانش برپایه قانون سوم نیوتن استفاده می کند. با این تعریف گسترده موتورهای مانند توربوجت، توربوفن، رم جت و موتور موشک، گونه هایی از موتور جت به شمار می روند؛ ولی معمولاً منظور از موتور جت توربینی است که با بیرون دادن گاز داغ برای پیش رانش به کار می رود. اصول کارکرد این نوع موتورها تقریباً ساده است؛ هوا از طریق یک مجرای ورودی به بخش کمپرسور وارد شده و متراکم می شود، سپس هوای متراکم وارد محفظه احتراق شده و با اضافه شدن سوخت به وسیله جرقه شمع اشتعال ایجاد می شود. گرمای ناشی از احتراق مخلوط هوا و سوخت باعث منبسط شدن و جریان یافتن آن به سمت انتهای موتور می گردد، این جریان منبسط شونده از میان یک سری پره های توربین عبور می کند که از طریق یک شفت به کمپرسور متصل شده اند. هوای منبسط شده توربین را به گردش در می آورد که در نتیجه باعث به حرکت در آمدن کمپرسور نیز می شوند. زمانی که هوای منبسط شونده بخش توربین را نیز پشت سر گذاشت با سرعتی بسیار بیشتر از زمانی که وارد موتور شده از آن خارج می شود که این تفاوت سرعت بین هوای ورودی و خروجی رانش مورد نیاز را ایجاد می کند. در واقع موتورهای توربو جت شتاب بسیار زیادی به حجم کمی از هوا می دهند.

۱-۱-۱ موتورهای توربوجت

موتورهای توربو جت، بیشتر بر نیروی تولیدی از گازهای خروجی اتکا دارند. در موتورهای توربوجت، ابتدا، هوا وارد کمپرسور شده و متراکم می گردد. اما چون این هوا با سرعت نسبتاً زیادی وارد موتور می شود برای احتراق مناسب نیست و بیشتر سوخت مصرف شده، بدون اشتعال هدر می رود. به همین دلیل دیفیوزر یا کاهنده سرعت استفاده می شود تا از سرعت هوا کاسته شود. در دیفیوزر، ابتدا از سرعت هوا کاسته و بر دما و فشار آن افزوده می شود. سپس این هوای آماده برای احتراق، به اتاقک

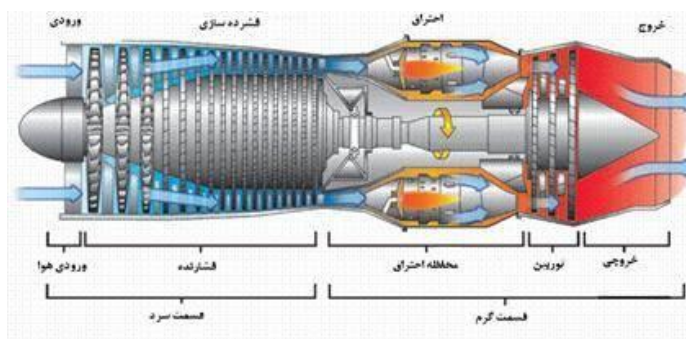
احتراق فرستاده می‌شود. در اتاقک احتراق^۱، هوا ابتدا وارد لوله احتراق شده، با سوخت مخلوط شده سپس محترق می‌شود. قسمتی از نیروی حاصله از این احتراق صرف گرداندن توربین شده و مابقی برای تولید نیروی رانش به کار می‌رود. گاهی در موتورهای توربوجت، بعد از شیبوره خروجی یا نازل، قسمتی به نام پس‌سوز قرار می‌دهند که بر نیروی پیش رانش می‌افزاید (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱- موتور جت

۲-۱- اجزای تشکیل دهنده موتور جت

- ورودی یا مدخل
- کمپرسور یا متراکم کننده
- محفظه احتراق
- توربین
- نازل یا خروجی (شکل ۲-۱)



شکل ۲-۱- قسمت‌های مختلف موتور جت

¹ combustion chamber

۱-۲-۱ ورودی

این قسمت اولین بخش است که هوای ورودی به موتور از آن می‌گذرد. این بخش یک مجرای همگرا یا واگرا است و وظیفه آن کاهش سرعت و یکنواخت کردن جریان هوای ورودی به موتور است. اگر سرعت هوای ورودی به کمپرسور زیاد باشد، سرعت هوا در نوک پره‌های آن به سرعت صوت می‌رسد و برای گردش کمپرسور نیروی زیادی صرف خواهد شد. اگر سرعت هوای ورودی زیر صوت باشد، این مدخل واگرا خواهد بود. اگر سرعت بالای سرعت صوت باشد (ما فوق صوت)، این مجرا همگرا خواهد بود. زیرا رفتار جریان ما فوق صوت و زیر صوت بر عکس هم است. در یک جریان ما فوق صوت هوا در عبور از یک مجرای همگرا سرعتش کم می‌شود و در سرعت‌های زیر صوت بر عکس؛ بنابراین مدخل هواپیماهای زیر صوت واگرا است تا سرعت را کاهش دهد و کمکی نیز برای کمپرسور باشد.

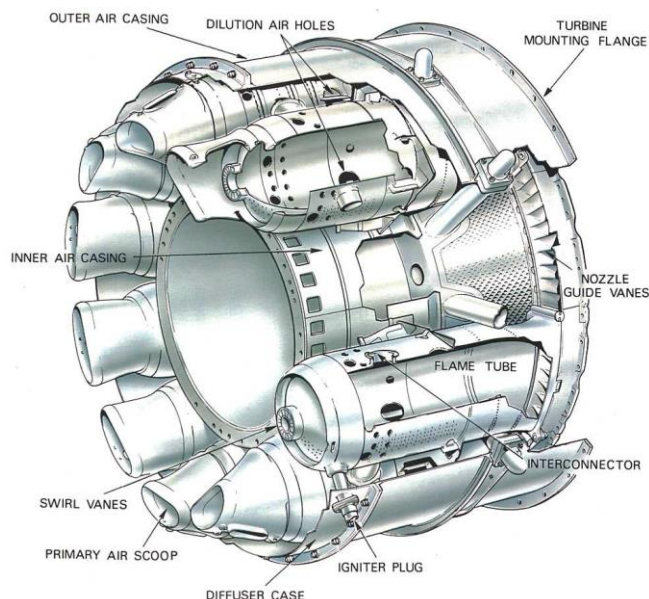
۱-۲-۲ متراکم کننده

هوا بعد از مدخل وارد کمپرسور می‌شود. وظیفه کمپرسور فشرده کردن هوا است. کمپرسورها به دو گروه اصلی، کمپرسورهای گریز از مرکز و کمپرسورهای جریان محوری تقسیم می‌شوند.

۱-۲-۳ محفظه احتراق

بعد از کمپرسور و دیفیوزر قسمتی به نام محفظه احتراق وجود دارد که از یک یا چند اتاقک، چند شمع، چند سوخت پاش و یک یا دو عدد شیر تخلیه^۲ تشکیل شده است (شکل ۱-۳). هوای فشرده پس از خروج از کمپرسور و عبور از دیفیوزر، وارد محفظه احتراق می‌شود. سوخت مناسب توسط سوخت پاش‌ها به داخل هوای متراکم پاشیده می‌شود. هوا در اثر تراکم دمایش بالا رفته و به محض اضافه شدن سوخت، مخلوط مناسب جهت احتراق آماده می‌شود. جرقه لازم در هنگام شروع توسط شمع‌ها تولید شده و مخلوط محترق می‌شود. البته برای ایمنی بیشتر قبل از پاشیده شدن سوخت سیستم جرقه روشن شده و شمع‌ها شروع به جرقه زدن می‌کنند تا به محض پاشیدن سوخت احتراق فوراً انجام شده و از انفجار جلوگیری به عمل آید. بدین ترتیب انرژی موجود در مخلوط هوا و سوخت در اثر احتراق تبدیل به انرژی حرارتی شده و انرژی جنبشی هوای عبوری از موتور را افزایش می‌دهد.

^۲- drain valve



شکل ۱-۳- محفظه احتراق

احتراق

همانطور که اشاره شد هوای کمپرسور به علت فشار و سرعت زیاد در مسیر وارد شدن به محفظه احتراق به دیفیوزر می‌رود. این قسمت به علت شکل مخصوصی که دارد باز هم فشار هوا را زیاد کرده و از سرعت آن می‌کاهد و آنگاه که برای سوختن مناسب باشد، هوا وارد محفظه احتراق می‌شود.

سوخت مورد استفاده موتورهای جت از نوع سوخت سنگینی به نام JP-4 است که نوعی نفت سنگین می‌باشد. نسبت مخلوط هوا و سوخت در محفظه احتراق از $45/1$ تا $130/1$ می‌تواند تغییر کند. از کل هوای ورودی به محفظه احتراق 25% آن به مصرف احتراق می‌رسد و بقیه هوا یعنی 75% آن به مصرف خنک کردن شعله، رقیق کردن آن و ساختن لایه‌ای از هوای فشرده جهت جلوگیری از برخورد شعله به دیواره محفظه و همچنین نگهداشتن شعله در وسط محفظه احتراق می‌گردد. گازهای داغ با فشار زیاد از قسمت انتهایی محفظه احتراق که به تدریج تنگتر شده و مانند یک لوله مخروطی است، عبور می‌کند این باعث افزایش سرعت گازهای داغ می‌شود و هوای داغ با پره‌های ثابت توربین و متحرک توربین برخورد کرده، سبب چرخیدن توربین می‌شود.

۴-۲-۱ توربین

قدرت و توان مورد نیاز برای گردش کمپرسور توسط توربین تامین می‌شود. شکل توربین شبیه به کمپرسور است اما با این تفاوت که به کمپرسور انرژی داده می‌شود تا هوا را فشرده کند ولی در توربین از جریان گازهای گرم عبوری انرژی گرفته می‌شود.

۵-۲-۱ نازل یا خروجی

نازل محل خروج گازهای عبوری از توربین است. در نهایت هوای خروجی از این نازل است که نیروی پیشرانۀ موتور توربوجت را تولید می‌کند.

پس سوز

هنگامی که گازهای خروجی از موتور خارج می‌شوند، دارای انرژی گرمایی بسیار بالایی می‌باشد که این گاز داغ از طریق نازل‌های سوخت‌پاش به آن سوخت تزریق می‌شود. در قسمت پس‌سوز، با مشتعل ساختن دوباره گازهای خروجی به طور قابل توجهی بر نیروی پیش رانش افزوده می‌شود. البته استفاده از پس سوز فقط در شرایط اضطراری و شرایط جنگی مجاز است در غیر این صورت به علت مصرف بسیار بالای سوخت از آن استفاده نمی‌شود.

۳-۱- سیستم احتراق

سیستم احتراق، شامل سوخت پاش، شمع، اتاقک و لوله احتراق می‌باشد. فرآیند احتراق در درون لوله‌های احتراق صورت می‌پذیرد که این عمل با وارد شدن هوا به اتاقک و مخلوط شدن آن با سوخت سپس احتراق آن به وسیله شمع انجام می‌شود [۱].

۱-۳-۱ شمع

اولین عمل موثر شمع آتش زدن مخلوط هوا و سوخت درموتور می‌باشد. شمع ابزاری برای انتقال جرقه‌های متناوب برق به محفظه احتراق می‌باشد (شکل ۱-۴). برق به سر شمع‌ها می‌رسد و طوری

تنظیم شده که به هنگام فشردگی هوا و سوخت جرقه از شمع ساطع شده و باعث انفجار سوخت و حرکت موتور جت می‌شود، در موتورهای جت شروع احتراق و شعله به وسیله شمع انجام می‌گیرد و پس از آنکه موتور به شرایط پایدار رسید جرقه زدن قطع می‌شود.



شکل ۱-۴- شمع موتور هوایی

۱-۳-۲ اجزای تشکیل دهنده یک شمع

بدنه فلزی، سرامیک (عایق)، الکترود میانی و چسب

۱-۳-۳ بدنه فلزی

هر شمع دارای یک بدنه فلزی است. این قسمت شمع رسانا است تا با الکترود داخلی بتواند در اثر عبور جریان الکتریسیته قوس الکتریکی تشکیل دهد و باعث ایجاد جرقه در محفظه احتراق شود.

۱-۳-۴ عایق شمع

عایق شمع از جنس سرامیک است که در برابر حرارت، فشار و ولتاژ بالا بسیار مقاوم است. این عایق علاوه بر این که الکترود مرکزی را نگه می‌دارد به منزله یک محافظ برای الکترود نیز هست و جریان الکتریسیته مجبور است فقط از داخل الکترود بگذرد. همچنین عایق باید در مقابل خنک شدن و لرزش مقاومت داشته باشد.

۱-۳-۵ الکتروود

شمع دارای الکتروود میانی (مثبت) و بیرونی (منفی) است که همان بدنه شمع می‌باشد. الکتروود میانی در وسط عایق سرامیکی قرار گرفته و در مقابل فشار زیاد تا ۴۰ اتمسفر و حرارت بالا مقاوم است. فاصله بین پوسته و الکتروود مرکزی شمع، نخستین عامل جرقه زنی است.

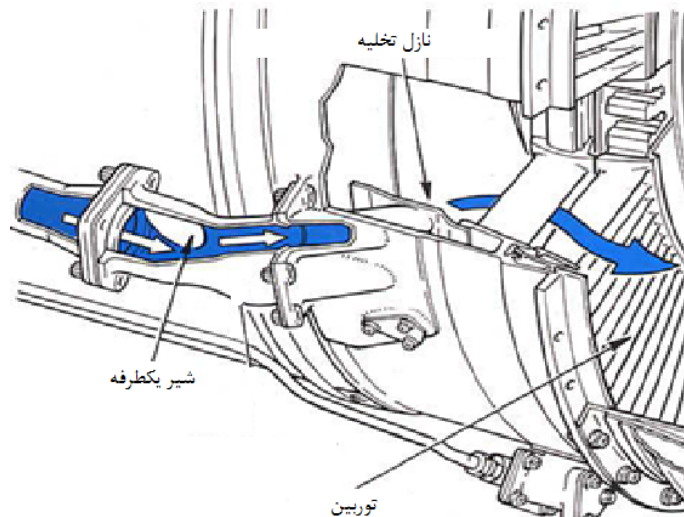
۱-۴- واحد اشتعال^۳

اشتعال با انرژی بالا^۴ برای روشن کردن تمام موتورهای جت استفاده می‌شود همواره یک سیستم دوگانه روی موتور نصب می‌شود. هر سیستمی دارای واحد اشتعال می‌باشد که شمع به آن متصل می‌باشد. هر واحد اشتعال یک ولتاژ اولیه کمی را دریافت می‌کند که توسط مدار الکتریکی سیستم روشن کننده، با سیستم الکتریکی کنترل می‌شود. انرژی الکتریکی در واحد ذخیره می‌شود تا زمانیکه در مقدار از قبل تعیین شده‌ای انرژی به صورت ولتاژ بالا با جریان بالا از طریق شمع اشتعال آزاد شده و جریان یابد.

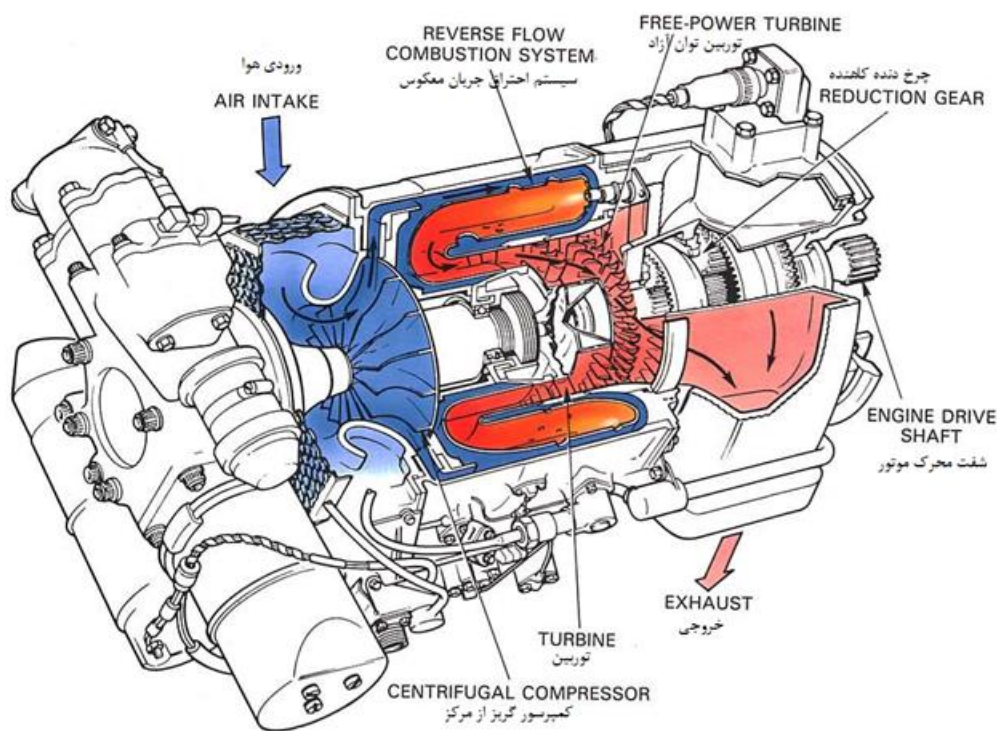
واحد اشتعال بر حسب انرژی ذخیره ده در آن مقایسه می‌شوند. یک انرژی خروجی بالا برای اطمینان از اینکه موتور در ارتفاع بالا به طور منظم کار کند و حتی در برخی موارد برای روشن شدن ضروری می‌باشد. با این حال، در برخی از شرایط پروازی مانند فرود آمدن یا بلند شدن از زمین در باران یا برف شدید، شاید لازم باشد که سیستم اشتعال به طور پیوسته کار کند تا در صورت خاموش شدن شعله، اشتعال به صورت خودکار صورت گیرد. برای این شرایط، یک مقدار انرژی جرقه کم مانند J ۳ یا J ۶ ترجیح داده می‌شود زیرا که عمر شمع اشتعال را بالا می‌برد. در نتیجه برای تطبیق با تمام شرایط کارکرد موتور، یک سیستم ترکیبی از انرژی زیاد و کم مطلوب می‌باشد. چنین سیستمی متشکل از یک واحد با خروجی بالا به یک شمع اشتعال و واحد دومی با خروجی کم به شمع دیگر اشتعال می‌باشد. با این حال، برخی از واحدهای اشتعال قادر به تامین خروجی‌های بالا و پایین در موارد ضروری می‌باشند. در شکل (۱-۵) و (۱-۶) دو نمونه روشن شدن با انرژی بالا را می‌توان مشاهده کرد.

³ ignition unit

⁴ high energy ignition



شکل ۱-۵- روشن کردن با برخورد هوا



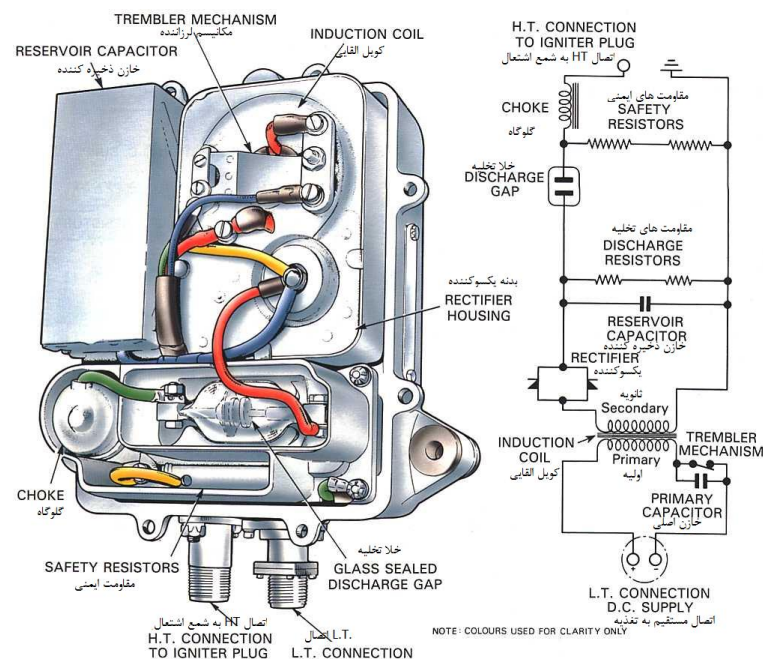
شکل ۱-۶- روشن کننده توربین گازی

واحدهای اشتعال ممکن است با جریان مستقیم نیز تغذیه شوند و با یک مکانیسم لرزاننده یا مدار ترانزیستوری کار کنند یا با جریان متناوب تغذیه شده و با یک ترانسفرمر کار کنند.

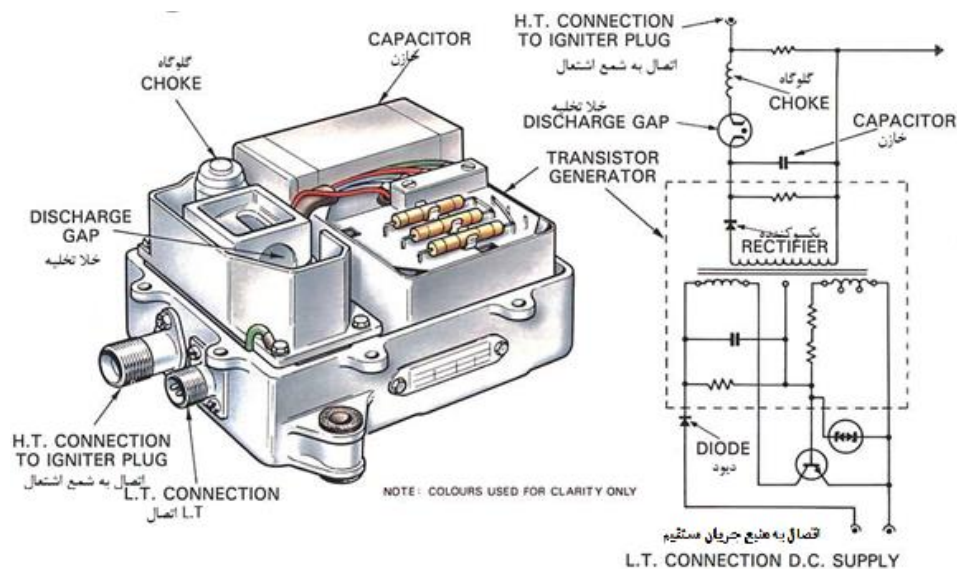
واحد اشتعال نشان داده شده در شکل (۷-۱) نمونه ای از واحد جریان مستقیم از نوع لرزاننده می باشد که خازن ذخیره کننده را با یکسوکننده ولتاژ بالا شارژ می کند. زمانیکه ولتاژ در خازن برابر با مقدار

آستانه از گپ تخلیه باشد، انرژی از طریق سطح شمع اشتعال تخلیه می‌شود. یک گلوگاه نیز برای طولانی کردن زمان تخلیه قرار داده شده است و یک مقاومت تخلیه نیز تعبیه شده است تا اطمینان حاصل شود که هر انرژی باقی مانده ذخیره شده در خازن در عرض یک دقیقه بعد از خاموش شدن سیستم تخلیه شده و از بین برود. همچنین یک مقاومت ایمنی قرار داده شده است تا واحد در مواردی که سیم ولتاژ بالا قطع شود، به صورت ایمن کار کند.

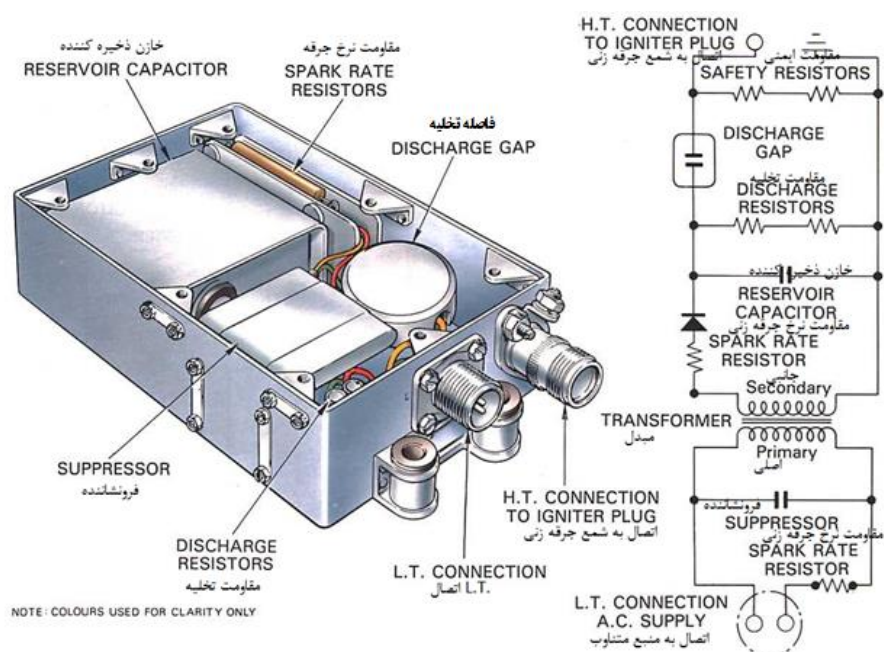
عملکرد واحد از نوع ترانزیستوری شبیه به نوع دیگر جریان مستقیم (واحد از نوع لرزاننده) می‌باشد به جز اینکه، واحد لرزاننده با یک مدار ترانزیستوری جایگزین شده است. یک نمونه از واحد ترانزیستوری در شکل (۸-۱) نشان داده شده است. چنین واحدی نسبت به واحد از نوع لرزاننده دارای مزیت‌های زیادی می‌باشد چرا که قطعات متحرک ندارد و این باعث می‌شود که عمر آن بسیار بیشتر باشد. ابعاد این نوع واحد کوچکتر شده و وزن آن نیز نسبت به نوع لرزاننده کمتر می‌باشد.



شکل ۱-۷- یک واحد اشتعال از نوع لرزاننده



شکل ۱-۸- یک واحد اشتعال ترانزیستوری



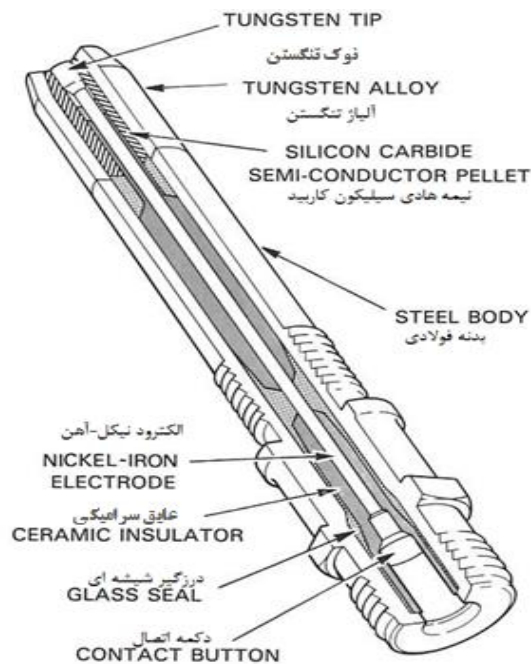
شکل ۱-۹- یک واحد احتراق جریان متناوب

واحد احتراق جریان متناوب، نشان داده شده در شکل (۱-۹)، دریافت کننده یک جریان متناوب می‌باشد که از یک ترانسفرمر و یسکوکننده عبور کرده تا یک خازن را شارژ نماید. زمانی که ولتاژ در خازن برابر با مقدار آستانه خلا تخلیه باشد، خازن انرژی را از طریق سطح شمع آزاد می‌کند. مقاومت‌های ایمنی و تخلیه مانند واحد لرزاننده نصب می‌شود.

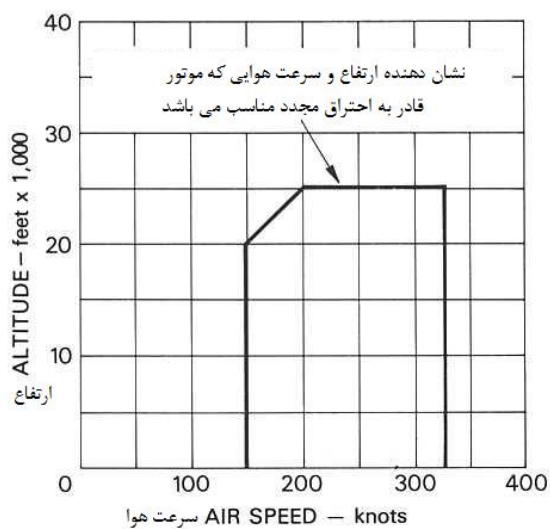
دو نوع اصلی از شمع‌های احتراق وجود دارد؛ نوع فاصله هوایی فشار بالا و نوع تخلیه سطحی ولتاژ پایین. نوع فاصله هوایی در کارکرد مانند شمع موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی می‌باشد ولی فاصله هوایی بزرگتری بین الکترود و بدنه دارد. یک اختلاف $25000V$ برای ایجاد جرقه در این نوع لازم می‌باشد. این ولتاژ بالا نیازمند ایزوله کردن بدون نقص مدار می‌باشد. شمع از نوع تخلیه سطحی شکل (۱-۱۰)، دارای عایقی می‌باشد که انتهای آن از یک قطعه نیمه‌هادی تشکیل شده است که اجازه می‌دهد تخلیه بین الکترود مرکزی و بدنه اتفاق بیفتد. این کار سطح نیمه‌هادی را یونیزه می‌نماید تا یک مسیر با مقاومت کم را برای تخلیه انرژی ذخیره شده در خازن ایجاد نماید. تخلیه به شکل یک جرقه با شدت بالا از الکترود به بدنه ظاهر می‌شود که برای کارکرد، تنها نیاز به اختلاف ولتاژ $2000V$ دارد. نرخ جرقه‌زنی طبیعی یک سیستم احتراق معمولی بین ۶۰ تا ۱۰۰ جرقه در دقیقه می‌باشد. جایگزینی شمع در دوره‌های مشخص به دلیل فرسایش الکترود در هر بار تخلیه، لازم و ضروری می‌باشد.

۱-۴-۱ احتراق دوباره

موتور جت نیازمند تجهیزاتی برای اشتعال دوباره در مواردی که شعله در سیستم احتراق خاموش شود، می‌باشد. با این حال، توانایی موتور برای اشتعال دوباره بسته به ارتفاع و سرعت رو به جلوی هواپیما متغیر خواهد بود. یک محدوده‌ی احتراق مجدد که نشان دهنده شرایط پروازی می‌باشد که احتراق مجدد موتور وضعیت مناسب دارد، در شکل (۱-۱۱) نشان داده شده است. در این محدوده، جریان هوای عبوری از موتور، کمپرسور را با سرعت مناسب برای احتراق مجدد به دوران وا می‌دارد. بنابراین تنها چیز لازم به شرط موجود بودن سوخت، کارکردن سیستم احتراق است. این امر توسط کلید جداگانه‌ای که تنها سیستم احتراق را فعال می‌کند، صورت می‌گیرد [۲].



شکل ۱-۱۰ - نمونه شمع احتراق



شکل ۱-۱۱ - یک پنجره‌ی احتراق مجدد پرواز

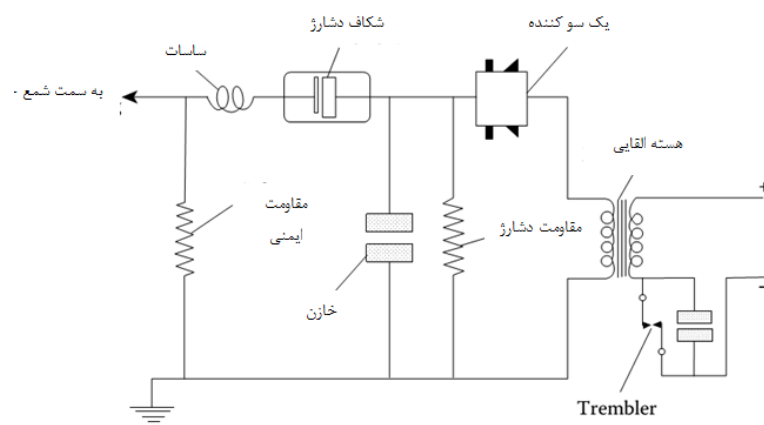
۲-۴-۱ احتراق جرقه‌ای

رضایت بخش ترین و راحت ترین حالت احتراق برای توربین های گازی نوعی از تخلیه، مانند یک جرقه یا تخلیه قوسی است. در احتراق توسط یک سطح گرم و یا یک گاز داغ، حرارت موجود به دلیل پخش

شدن در سراسر حجم زیادی از گاز، هدر می‌رود. جرقه یا تخلیه، با این حال، انرژی الکتریکی را به نحو نسبتاً کارآمدی به گرمایی تبدیل می‌کنند که در یک حجم نسبتاً کوچک متمرکز شده است. علاوه بر این، می‌توان کنترل کاملی بر روی فرکانس، مدت و مقدار انرژی در هر جرقه (تخلیه الکتریکی) اعمال نمود.

۳-۴-۱ واحد احتراق انرژی بالا

یک واحد احتراق پایه شامل یک واحد ژنراتور ولتاژ، سیستم شمع و شمع می‌باشد. عملکرد آن جذب قدرت از یک منبع الکتریکی و آزاد سازی انرژی به شمع جرقه در قالب پالس‌های کوتاه مدت است. نمودار مدار یک واحد جرقه‌زنی استاندارد در یک فرم ساده در شکل (۱-۱۲) نشان داده شده است. یک سیم پیچ القایی، اداره شده توسط یک ویبراتور الکترومکانیکی از منبع ۲۴ ولتی معمولی در دسترس، یک کندانسور خازنی را از طریق یک یکسو کننده ولتاژ بالا شارژ می‌کند تا اینکه ولتاژ خازن برابر با ولتاژ شکست شکاف تخلیه عایق بندی شده می‌شود، که معمولاً حدود ۲ kV است. کندانسور سپس از طریق شکاف سد عایق بندی شده، یک چوک، و شمع دشار سطحی، که همه به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند، تخلیه می‌شود. هدف از چوک کنترل مدت زمان جرقه است، در حالی که مقاومت ایمنی برای اطمینان از اتلاف انرژی ذخیره شده در خازن نصب شده است که باید زمانی که واحد در حال استفاده نیست، آن را در یک وضعیت شارژ شده نگه دارد.



شکل ۱-۱۲ واحد اشتعال انرژی بالای استاندارد

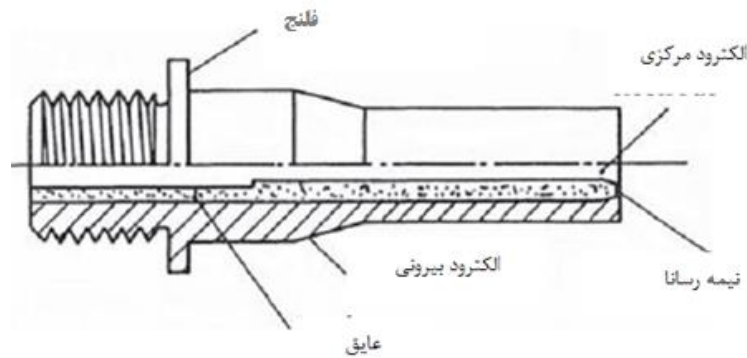
در سیستم‌های جدیدتر، ژنراتور ولتاژ تماس ارتعاشی با یک واحد شارژر ترانزیستوری جایگزین شده است، که این باعث افزایش عمر واحد اشتعال می‌شود [۳].

بسیاری از واحدهای احتراق در حال حاضر متناسب با تجهیزات موتور و هواپیمای منحصر به فرد تولید می‌شوند. هر دو واحدهای تک و دو کاناله در دسترس، و دارای سطح انرژی ذخیره شده بین ۱ J و ۱۲ J می‌باشند. در برخی از طراحی‌ها، به منظور افزایش میزان انرژی آزاد شده در جرقه‌زنی، جرقه تک محوره ساخته شده است. واحدهای خنک شونده به وسیله‌ی سوخت زمانی استفاده می‌شوند که درجه حرارت هوا محیط فوق العاده بالا باشد.

واحدهای مختص کاربردهای موتور توربین گازی کوچک برخی در حدود ۲ J دارند، که نرخ جرقه‌زنی معمولی آن‌ها ۲۵۰ جرقه در دقیقه است. برای موتورهای بزرگتر، انرژی ذخیره شده به طور معمول بین ۴ J و ۱۲ J است، نرخ جرقه حدود یک جرقه در هر ثانیه، و انرژی آزاد شده در نوک شمع بسته به طراحی آن بین ۲ J و ۴ J است.

۱-۴-۴ شمع تخلیه سطحی

سیستم انرژی بالا زمانی موثرترین حالت را دارد که در ترکیب با یک شمع تخلیه سطحی استفاده شود. این سیستم شامل یک الکتروود مرکزی و یک الکتروود بیرونی متصل به زمین است. این دو الکتروود به وسیله یک عایق سرامیکی از یکدیگر جدا شده‌اند که در سر آتش‌زن منتهی به یک لایه نازک از مواد نیمه‌هادی پایان می‌یابد، همانطور که در شکل (۱-۱۳) نشان داده شده است. وظیفه‌ی نیمه‌هادی تسهیل یونیزاسیون شکاف جرقه و امکان تولید جرقه از طریق منابع انرژی با ولتاژ نسبتاً کم است. یک ویژگی مهم مواد نیمه‌هادی این است که مقاومت الکتریکی آن با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد. این به این معنی است که هنگامی که یک ولتاژ خازنی اعمال و جریان از میان نیمه‌هادی جاری می‌شود، به سرعت در یک رشته نازک متمرکز شده و آن را ملتهب می‌کند، در نتیجه یک مسیر یونیزاسیون مابین الکتروودها فراهم می‌سازد. هنگامی که یونیزاسیون صورت گرفت، تخلیه اصلی در قالب یک قوس شعله مانند شدید رخ می‌دهد.



شکل ۱-۱۳- شمع تخلیه سطحی

شمع تخلیه سطحی در موسسه‌ی هواپیمایی رویال، فارنبرگ، در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ توسعه داده شد، و در اوایل دهه‌ی ۱۹۵۰ به عنوان یک قطعه استاندارد در تجهیزات تقریباً تمامی موتورهای هواپیما پذیرفته شد. عملکرد آن به طور قابل توجهی نسبت به تمام حالت‌های دیگر احتراق بهتر است، به طوری که در همه‌ی شرایط به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به دلیل تلفات و نشتی در سیستم، انرژی که به نوک شمع می‌رسد تنها حدود یک چهارم از انرژی آزاد شده توسط تخلیه خازن است. علاوه بر این، واتسون [۴] نشان داده است که تنها بخش کوچکی از این انرژی، در حدود یک سوم، به طور مستقیم مخلوط قابل احتراق را گرم می‌کند. قسمتی از باقی مانده انرژی از طریق انتقال به صفحه شمع هدر می‌رود، اما بزرگترین بخش به شکل تابش و امواج صوتی از بین می‌رود. ادگرز و کوبان [۵] اثرات فشار گاز و سایر متغیرهای مربوطه را بر روی مقدار انرژی آزاد شده در شمع بررسی کرده‌اند. مشخص شد که خیس کردن صفحه شمع به وسیله سوخت می‌تواند رهایش انرژی را تقریباً دو برابر سازد، اما مقادیر بیش از حد سوخت انرژی جرقه را کاهش می‌دهد و همچنین هسته‌ی شعله را سرد می‌کند. شرایط بهینه برای احتراق با تنها یک لایه بسیار نازک از سوخت بر روی صفحه شمع به دست می‌آید.

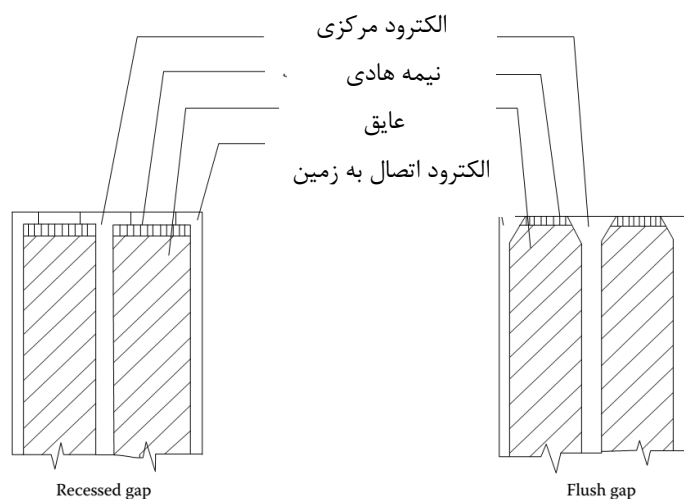
۱-۴-۵ عملکرد شمع

عملکرد یک شمع تخلیه سطحی معمولاً بر حسب نسبت انرژی در جرقه به انرژی ذخیره شده در خازن بیان می‌شود. همانطور که در بالا مورد بحث قرار گرفت، این فقط می‌تواند یک راهنمای تقریبی در اختیار قرار دهد چرا که تنها بخش کوچکی از انرژی جرقه به طور مستقیم در احتراق مشارکت

دارد. با این وجود، برای یک خازن ذخیره سازی ثابت، انرژی آزاد شده در جرقه یک معیار مفید و مناسب از قابلیت اشتعال آن در اختیار قرار می‌دهد.

۱-۴-۶ طراحی شمع

شمع‌های تخلیه سطحی را می‌توان به دو نوع اصلی دسته بندی کرد، با توجه به این که آیا نیمه‌هادی با الکترودها تراز شده است (آتش تراز)^۵ و یا دارای فرورفتگی است (آتش فرورفته)^۶ است، انرژی جرقه با افزایش عرض شکاف و یا کاهش عمق فرورفتگی افزایش یافته است. بنابراین، حداکثر اشتعال پذیری از شمع‌های تراز بدست می‌آید که عرض شکاف آن‌ها بزرگ است.



شکاف تراز ۱۴- دو نوع از شمع‌های تخلیه شکاف فرورفته

ساخت یک شمع با شکاف تراز نسبت به یک نوع با شکاف فرورفته دشوارتر، گران‌تر، و دارای استحکام مکانیکی کمتری است. از سوی دیگر، کارآمدی آن بیشتر است، یعنی، نسبت بیشتری از انرژی ذخیره شده برای احتراق در دسترس است، و عمر آن طولانی‌تر است. یکی دیگر از مزیت‌ها در مقایسه با شمع شکاف فرورفته حساسیت نسبت ترشوندگی سوختی است. این برای موتورهای هوایی بای پس و چند قرقه‌ای^۷ جدی تلقی می‌شود که مشخصه‌ی آن یک تاخیر طولانی بین روشن شدن موتور و دستیابی به شرایط جرقه‌زنی مناسب در منطقه اولیه است. در نتیجه، شمع ممکن است تحت شرایط

⁵ flush

⁶ sunken

⁷ multispool, bypass aero engines

نسبتاً مرطوب برای یک مدت نسبتاً طولانی جرقه بزند. اثر این خیس شوندگی سوختی در شمع تخلیه فرورفته متوقف کردن تخلیه به پایین فرورفتگی است، به طوری که اکثر انرژی جرقه صرف گرم کردن الکترودها می‌شود و سایش جدی به وجود می‌آید. بنابراین، تحت شرایط ترشوندگی سوختی، یک شمع شکاف فرورفته جرقه‌زنی ضعیف و عمر نسبتاً کمی دارد.

۱-۴-۷ عمر شمع

وست [۸] خاطر نشان کرده است که از آنجا که عمر موتورهای هواپیما به طور مداوم در حال افزایش است، به منظور به حداقل رساندن هزینه‌های تعمیر و نگهداری و تعویض‌های برنامه‌ریزی شده، اپراتورها نیاز به یک شمع دارند که در سراسر عمر موتور دوام آورد. اگر این امر غیر ممکن است، شمع باید حداقل عمری داشته باشد که با دوره‌ی بازرسی همزمان شود. برای اینکه ارزشمند باشد، هر گونه بهبود در عمر شمع باید شمع را قادر سازد تا زمان دوره‌ی بازرسی بعدی به میزان رضایت بخشی کار کند.

تجربه نشان داده است که عمر یک شمع تخلیه سطحی تا حدودی تابع رهايش انرژی در جرقه و همچنین شرایط عملیاتی محیطی است. هر جرقه باعث یک حفره‌ی کوچک در الکترودها می‌شود، که به تدریج دچار فرسایش می‌شوند تا اینکه در نهایت تماس بین دو الکتروود و نیمه‌هادی از بین می‌رود و واضح است که، هر چه انرژی در جرقه بزرگتر باشد، نرخ فرسایش بیشتر است.

عمر شمع را می‌توان با افزایش قطر الکتروود مرکزی، و در نتیجه افزایش حجم فلزی موجود برای فرسایش افزایش داد. با این حال، از آنجا که افزایش انسداد^۸ آیرودینامیکی یک شمع بسیار نامطلوب است، قطر خارجی آن باید ثابت باقی بماند، و هر گونه افزایش در اندازه الکتروود مرکزی تنها می‌تواند با کاهش عرض شکاف ایجاد شود. این به نوبه خود، انرژی جرقه را کاهش می‌دهد، که همچنین به افزایش عمر شمع کمک می‌کند. بنابراین، با افزایش قطر الکتروود مرکزی و کاهش عرض شکاف، عمر یک شمع ممکن است به میزان زیادی افزایش یابد، اما در ازای آن باعث کاهش انرژی جرقه می‌شود. آزمایشات نشان داده است که کاهش چهار برابری انرژی جرقه می‌تواند عمر شمع را حدوداً ۵ مرتبه افزایش دهد.

⁸ blockage

شرایط محیطی غالب در مجاورت شمع نیز اهمیتی برابر با اهمیت عمر جرقه زن دارند. یک محفظه احتراق حلقوی مدرن معمولاً دو جرقه زن در دو طرف مقابل حلقه دارد. در موتورهای با نسبت تراکم بالا، نرخ انتقال حرارت به صفحه‌ی شمع می‌تواند بسیار زیاد باشد به طوری که منجر به گرم شدن جدی نیمه‌هادی شود. هر گونه افزایش دمای بیش از 900 K باعث کاهش سریع در عمر الکتروود می‌شود. این به خاطر اکسیداسیونی است که فرسایش را تسریع می‌بخشد و همچنین باعث از بین رفتن تماس بین دو الکتروود و نیمه‌هادی می‌شود [۶].

یکی دیگر از عوامل موثر بر عمر نیمه‌هادی ترکیب شیمیایی گاز مجاور است. در گذشته، این گاز به طور معمول از ماهیت کاهنده‌ای برخوردار بود، و مواد نیمه‌هادی با توجه به این شرایط انتخاب می‌شدند. امروزه، با توجه به روند ادامه‌دار به سمت مناطق اولیه نازک^۹، گازهای محیطی اکسید کننده‌تر هستند.

مشکلات گرم شدن بیش از حد را می‌توان با هدایت یک فیلم هوای خنک کننده بر صفحه‌ی شمع کاهش داد. با این حال، این یک راه حل کاملاً رضایت بخش نیست زیرا اثر سرد کنندگی عملکرد سیستم شمع را در ارتفاع بالا مختل می‌سازد. شمع‌های جمع شدنی^{۱۰} گاهی اوقات در موتورهای بزرگ صنعتی استفاده می‌شوند، اما آنها مشکلات مکانیکی زیادی برای موتورهای هواپیما ایجاد خواهند کرد. راه حل بهتر می‌تواند توسعه مواد نیمه‌هادی جدیدی باشد که قادر به فعالیت در یک اتمسفر اکسید کننده و درجه حرارت بالا به مدت زمان طولانی باشد. می‌توان با کاهش تجهیزات انرژی - جرقه و با به کار گیری شمع‌هایی که، به عنوان یکی از ویژگی‌های طراحی اولیه، از الکتروودهایی با حجم بزرگ استفاده می‌کنند، افزایش بیشتری در عمر شمع ایجاد کرد.

۸-۴-۱ شکل‌های دیگری از شمع

اگر چه ترکیب واحد انرژی بالا و شمع تخلیه سطحی به طور گسترده‌ای برای احتراق توربین گازی استفاده می‌شود، روش‌های دیگری نیز برای احتراق برخی کاربردهای خاص در دسترس هستند.

^۹ leaner primary zone

^{۱۰} retractable

شمع مشعلی

شمع مشعلی شامل یک شمع جرقه و یک جت سوخت کمکی در یک محفظه‌ی رایج است. مجاورت این دو جزء به گونه‌ای است که احتراق پاشش سوخت توسط جرقه مشعلی از قطرات سوخته تولید می‌کند که احتراق پاشش سوخت اصلی را ایجاد می‌کند. عملکرد یک شمع مشعلی به محل آن نسبتاً حساس است. معمولاً، به درون فضای حلقوی بین لاینر و قلاف هوا در نزدیک سر بالادستی محفظه نصب می‌شود، اما حداقل یک محفظه احتراق حلقوی با یک شمع مشعلی نصب شده بر روی گنبد لاینر درون دماغه^{۱۱} تولید شده است.

مشکل اصلی شمع‌های مشعلی ترک خوردگی و چسبندگی سوخت در زمانی است که اتمایزر در حال اجرا نیست. این باعث انسداد دهانه‌ی تخلیه می‌شود، که به عمد بسیار کوچک ایجاد شده است (معمولاً با قطری در حدود ۰.۲۳ mm) تا یک پاشش به خوبی اتمیزه تولید شود. این مشکل را می‌توان با نصب دریچه‌های برقی برای خاموش کردن سوخت پس از روشن شدن، و با ارائه هوای پاک‌کننده‌ی تمیز کاهش داد، اما این موارد وزن و پیچیدگی اضافی ایجاد می‌کنند.

شمع‌های مشعلی برای محفظه‌های احتراق بخارساز الزامی هستند. به طور معمول، شمع‌ها در دو ربع پایینی محفظه احتراق در موقعیت‌های ساعت چهار و هشت واقع می‌شوند. در برخی از موتورها برای تسریع در گسترش شعله در سراسر منطقه احتراق اولیه، نازل‌های سوخت مکمل (بدون احتراق جرقه‌ای) در موقعیت‌های ساعت ده، دوازده، و دو نصب شده‌اند. پس از آنکه لوله‌های تبخیر گرم شدند و شعله به طور کامل برقرار شد، سوخت پایلوت و شمع اخگری^{۱۲} خاموش می‌شود.

عوامل حاکم بر نرخ گسترش شعله در محفظه احتراق بخارساز حلقوی توسط اپدیکه [۷] مورد بحث قرار گرفته است. دمای هوای ورودی یک عامل مهم است. در واقع، زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۹۰٪ گسترش کامل چندین برابر افزایش می‌یابد زمانی که درجه حرارت از محیط عادی به ۲۲۰K کاهش می‌یابد. نوسان سوخت و نسبت هوا به سوخت نیز اثر چشمگیری بر نرخ گسترش شعله دارند. همچنین جالب توجه است که فاصله خروجی‌های بخارساز، یک متغیر مهم است؛ هرچه این فضا گسترده‌تر، نرخ انتشار کمتر می‌شود.

¹¹ snout

¹² spark igniter

شمع گرمکن

عملکرد یک شمع گرمکن ایجاد جرقه مجدد سریع شعله‌ای است که به دلیل ورود ناگهانی آب و یخ، و یا به واسطه‌ی کمبود سوخت موقت خاموش شده است. ابعاد شمع به گونه‌ای انتخاب می‌شود که متناسب با اندازه لاینر باشد، اما یک شمع معمولی به شکل یک استوانه توخالی، با طول ۲۵ mm و قطر ۱۵ mm می‌باشد.

شمع گرم‌کن بر روی دیواره‌ی لاینر نصب می‌شود و از منطقه اولیه بیرون می‌زند که در آن در معرض گازهای شعله در دمای بالا قرار می‌گیرد. این مکان ایده آل برای روشن شدن مجدد مخلوط سوخت و هوا در صورت یک خفگی ناگهانی است. یک ماده شمع ایده‌آل دارای ترکیبی از گرمای ویژه، چگالی، و هدایت حرارتی بالا همراه با مقاومت قوی در برابر اکسیداسیون و شوک حرارتی است. آزمایش‌ها بر روی شمع گرمکن پلاتینی بسیار رضایت بخش می‌باشد، اما این مواد بیش از حد گران است [۸]. سیلیکون کاربید متصل شده به نیتريد به عنوان یک جایگزین موثر ثابت شده است، و عمر سرویس دهی در هواپیماهای نظامی بیش از ۴۰۰۰ ساعت محقق شده است. در آزمایش‌های انجام شده بر روی موتورهای رولز رویس پروتئوس و وایپر II، روشن کردن مجدد برای مدت زمان ۱۲ ثانیه پس از خاموش شدن موتور به دست آمده است.

خطر اینکه یک شمع و یا بخشی از یک شمع، جدا شود و به پره‌های توربین آسیب برساند اشکال اصلی شمع گرم‌کن می‌باشد. به همین دلیل است که کاربردهای کمی پیدا کرده‌اند. با این حال، به نظر می‌رسد برای موتورهای هلیکوپتر مناسب باشند.

شمع سطح داغ

اگر چه احتراق یک پاشش سوخت توسط یک سطح داغ از لحاظ فنی امکان پذیر، و بارها نشان داده شده است، به طور معمول به عنوان یک پیشنهاد عملی در توربین‌های گازی در نظر گرفته نمی‌شود چراکه میزان بالایی از انتقال حرارت برای تبخیر سوخت و بالا بردن درجه حرارت بخار - هوا به نقطه-ی اشتعال در زمان بسیار کوتاهی که مخلوط در تماس با سطح داغ است، مورد نیاز خواهد بود. دلیل این که چرا اشتعال جرقه‌ای موفق است، زیرا این اشتعال یک انتقال تقریباً آنی گرما به مخلوط تازه را فراهم می‌سازد. با این حال، یک شکل عملی از جرقه‌زنی سطح داغ توسط سینتسبری [۹] برای موتور

PT6 توسعه داده شد. این سیستم شامل گرمایش الکتریکی است و گزارش شده است که عملکرد رضایت بخشی برای تعداد زیادی از سوخت‌ها، از جمله روغن دیزل سنگین داشته است.

جت پلاسما

این روش جرقه زنی توسط واینبرگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۱۰-۱۲] جت پلاسمای مورد استفاده در آزمایش‌های اولیه آن‌ها متفاوت از یک شمع معمولی است که در آن تخلیه الکتریکی در یک حفره کوچک رخ می‌دهد که از طریق یک کاپیلاری کوچک با یک میحط پلاسمای مناسب تامین می‌شود. فشار و دمای بالای تولید شده توسط تخلیه باعث می‌شود که پلاسما به عنوان یک جت مافوق صوت از میان یک دهانه‌ی واقع در انتهای پایین دستی حفره خارج شود. با تغییر خوراک به حفره، ورودی انرژی، و اندازه دهانه‌ی تخلیه، می‌توان درجه حرارت جت پلاسما و سرعت آن و از این رو فاصله نفوذ آن را تغییر داد [۱۱]. گازهای تست شده شامل نیتروژن و هیدروژن است و اثربخشی آن‌ها به عنوان یک منبع احتراق به محتوای بالای رادیکال‌های آن‌ها نسبت داده شده است.

شمع لیزری

برای بیش از ۳۰ سال، باور بر این بوده است که خروجی متمرکز از یک پرتو لیزر سوئیچ قدرتمند می‌تواند منجر به شکست الکتریکی گازها شود. این پدیده دارای پتانسیلی آشکار برای جرقه‌زنی مخلوط قابل احتراق است و به نظر می‌رسد مزایایی نسبت به روش‌های مرسوم احتراق داشته باشد. این روش اجازه می‌دهد که محل احتراق دقیقاً در نقطه‌ای درون منطقه احتراق اولیه قرار بگیرد که در آن شرایط جرقه‌زنی مطلوب‌ترین است، و همچنین از تلفات حرارتی مختلف زمانی که شمع بر روی دیواره‌ی لاینر نصب شده است رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کند. این تلفات به ویژه مهم است به این دلیل که هسته شعله اولیه در طول لحظات ابتدایی و آسیب پذیرترین لحظات خود در مجاورت نزدیک به الکترودها قرار داد که در همین زمان در معرض اثرات سرکننده‌ی هوای خنک کننده نازکی است که بر صفحه‌ی شمع جریان دارد.

در اشتعال جرقه‌ای معمولی، مدت زمان پالس انرژی مهم است. اگر زمان گرم کردن بیش از حد طولانی شود، تلفات حرارتی به گازهای پیرامون زیاد خواهد بود و هسته شعله اولیه خاموش خواهد

شد. از سوی دیگر، اگر زمان حررات دهی بسیار کوتاه باشد یک موج انفجار قدرتمند ایجاد می‌شود که انرژی را از سایت احتراق خارج می‌سازد.

شمع شیمیایی

چندین مواد شیمیایی وجود دارند که در تماس با هوا به صورت خود به خودی مشتعل شده و میزان بالایی از انرژی را آزاد می‌سازند. آزمایشات نشان داده است که مقادیر بسیار کمی از این سوخت‌های به اصطلاح آتش‌زا (حدود ۲ CC) بسیار موثر است زمانی که از طریق یک لوله تزریق هیپودرمیک به منطقه اصلی تزریق شوند. سوخت‌های آتش‌زا شامل تری متیل آلومینیوم، تری اتیل آلومینیوم و آلومینیوم بوروهیدرید هستند.

۱-۴-۹ اضافه کردن گاز

اثر افزودن گاز بر روی محدوده‌ی احتراق توسط ژیانگ و همکاران [۱۳] با استفاده از یک محفظه احتراق تامین شده با سوخت نفت سفید مورد مطالعه قرار گرفته است. در برخی از آزمایش‌ها، سوخت گازی ترکیب نامشخص به هوای ورودی بالادستی محفظه احتراق تزریق شده است. در برخی دیگر، به خود شمع جرقه تزریق شده است. نتایج نشان می‌دهد که محدودیت احتراق را می‌توان به سطوح پایین‌تری از فشار، بوسیله‌ی تزریق موضعی سوخت گازی به درون هسته‌ی جرقه بسط داد.

۱-۴-۱۰ تزریق اکسیژن

اثر مفید اضافه کردن اکسیژن در تمامی جنبه‌های عملکرد احتراق به‌خوبی شناخته شده است. افزایش میزان اکسیژن مخلوط پروپان- هوا از مقدار طبیعی ۲۱٪-۵۰٪ نیاز به انرژی احتراق را تا ۴۰ برابر کاهش داده است. ثابت شده است که این اثر برای احتراق پاشش‌های سوخت در محفظه احتراق توربین گازی نیز مفید می‌باشد، که در آن احتراق در فشار کم تا حد زیادی توسط تزریق اکسیژن به منطقه اصلی تسهیل می‌یابد [۱۴].

۱-۴-۱۱ عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم شمع

عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد سیستم شمع، متغیرهای جریان و پارامترهای سوختی می‌باشند. همه‌ی این عوامل به صورت تجربی در تعدادی از تحقیقات انجام شده در هر دو محفظه احتراق ایده‌آل و واقعی بررسی شده است.

۱-۴-۱۲ سیستم شمع

مهم ترین ویژگی‌های یک سیستم شمع عبارتند از انرژی، مدت زمان، و فرکانس تخلیه جرقه هستند، که وابسته به طراحی واحد جرقه، اندازه خازن ذخیره سازی، و طراحی شمع می‌باشند.

۱-۴-۱۳ انرژی جرقه

به طور کلی، نشان داده شده است که، از کل انرژی آزاد شده در هنگام تخلیه خازن، نسبتی که در جرقه ظاهر می‌شود با افزایش فشار، عرض شکاف و سرعت هوا افزایش می‌یابد. اثر مفید فشار و عرض شکاف از این واقعیت سرچشمه می‌گیرد که افزایش در هر کدام از این دو، تعداد مولکول‌های موجود در مسیر قوس الکتریکی را افزایش می‌دهد. این امر مقاومت الکتریکی شکاف را افزایش می‌دهد، که در ادامه به یک ولتاژ شکست بالاتر نیاز دارد، و منجر به انرژی جرقه‌ی بالاتر می‌شود.

افزایش سرعت هوا انرژی موجود در جرقه را افزایش می‌دهد. این تابش به دلیل کشش^{۱۳} جرقه است، که مقاومت الکتریکی آن و همچنین رهایش انرژی آن را نیز افزایش می‌دهد، و همچنین به دلیل کاهش افت حرارتی به الکترودها است چرا که قوس توسط جریان هوا به پایین دست صفحه‌ی شمع جا به جا می‌شود.

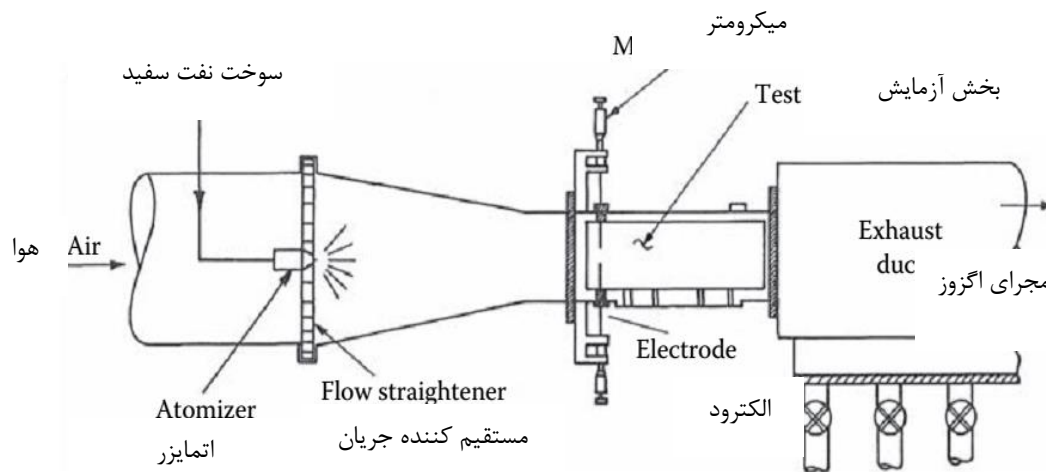
۱-۴-۱۴ مدت زمان جرقه

همانطور که در بالا بحث شد، از کل انرژی ذخیره شده در خازن، تنها بخش کوچکی در گرم کردن مخلوط قابل احتراق مؤثر است. از باقی مانده، برخی صرف تلفات در واحد جرقه زنی، به عنوان مثال، تلفات دی الکتریک خازن می‌شود، و بقیه در تابش الکترومغناطیسی و صوتی جرقه به هدر می‌رود. وقتی تخلیه جرقه سریع است، این تلفات انرژی بسیار بالا است؛ از سوی دیگر، اگر مدت زمان جرقه

¹³ stretching

بیش از حد طولانی باشد، انرژی بر روی حجم زیادی از مخلوط جاری پخش می‌شود، و دمای گاز برای ایجاد جرقه‌زنی بیش از حد کم است.

بر اساس یافته‌ها، معادلاتی برای محاسبه مدت زمان جرقه بهینه برای هر نوع مخلوط مشخص و شرایط جریان استخراج شده است. در طیف وسیعی از شرایط بررسی شده، مدت زمان جرقه بهینه بین ۳۰ و ۹۰ میکرو ثانیه پیدا شده، و بالاترین میزان متعلق به مخلوط‌های استوکیومتری است. همچنین مشخص شده که مدت زمان جرقه بهینه تحت تاثیر تلاطم نمی‌باشد، اما با افزایش سرعت کاهش می‌یابد [۱۵].



شکل ۱-۱۵- دیاگرام شماتیک از تجهیزات آزمون شمع

۱-۴-۱۵ نرخ جرقه‌زنی

در هنگام آزمایش، جریان هوای موتور و جریان سوخت هر دو با زمان افزایش می‌یابند، اما با نرخ‌های مختلف، که منجر به تغییرات گسترده‌ای در قدرت مخلوط مجاور شمع می‌شود (شکل ۱-۱۵). جرقه زنی تنها زمانی می‌تواند رخ دهد که تخلیه جرقه با مخلوط موضعی که درون محدوده‌ی اشتعال پذیری قرار دارد، تلاقی داشته باشد. تحت این شرایط، افزایش نرخ جرقه‌زنی به احتمال زیاد به مراتب تاثیر بیشتری از افزایش انرژی جرقه بر روی احتراق دارد. یک روش جایگزین برای از بین بردن مشکلات روشن کردن، زمان تزریق سوخت و افزایش مقدار سوخت به داخل محفظه احتراق است، که در نتیجه شرایط قدرت مخلوط در منطقه اشتعال را تغییر می‌دهد. اگر چه نرخ جرقه‌زنی بالا سودمند

است، به ویژه در شرایط روشن شدن افراطی^{۱۴}، برای هر واحد اشتعالی با هر اندازه داده شده تنها می-تواند با کاهش انرژی جرقه به دست آید. تجربه نشان داده است که یک فرکانس جرقه‌زنی بین یک یا دو در هر ثانیه، بسته به کاربرد، مستلزم حداقل صرف قدرت است و نتیجه‌ی آن متراکم‌ترین شکل واحد جرقه‌زنی است.

۱-۴-۱۶ محل شمع

در بسیاری از توربین‌های گازی اولیه، محل شمع به شیوه‌ای حدوداً دلخواه تعیین می‌شد، و دسترسی برای نصب و جایگزینی اصلی‌ترین لازمه بود. اکنون مشخص شده است که موقعیت شمع، تاثیر کنترل کننده بر روی هر دو عملکرد سیستم جرقه‌زنی و عمر شمع دارد.

در تصمیم‌گیری در مورد بهترین موقعیت برای شمع، یک شرط این است که باید به منطقه اولیه محدود شود، به طوری که هسته داغ گاز ایجاد شده به وسیله‌ی شمع توسط عمل وارونگی جریان به بالادست بازگردد. این به معنی یک مکانیسم برای احتراق است که به موجب آن پاکت سوخته شده‌ی گاز در داخل وارونگی نگه داشته شده، به طور مداوم چرخانده شود، و در عین حال، تا زمانی که کل منطقه اولیه با شعله پر شود، به بیرون منتشر شود.

آزمایشات نشان داده است که یک موقعیت عالی برای شمع نزدیک به خط مرکزی لاینر، در مجاورت نازل سوخت است [۱۶]. متأسفانه از نظر دسترسی و تداخل با الگوی جریان هوا، این موقعیت مناسب نمی‌باشد. علاوه بر این، صفحه شمع به احتمال زیاد توسط رسوب کربن مسدود می‌شود و به واسطه‌ی گرم شدن بیش از حد آسیب می‌بیند. محل شمع معمولاً بر روی قسمت استوانه‌ای لاینر، در نزدیکی لبه بیرونی اسپری است. با این حال، بسیار مهم است که شمع در معرض مرطوب شدن بیش از حد سوخت، چه به وسیله‌ی برخورد مستقیم از اسپری و یا در نتیجه جریان سوخت در طول دیوار لاینر قرار نگیرد.

نوک شمع باید به اندازه کافی از لاینر بیرون بزند تا لایه‌ی هوای خنک کننده در امتداد دیواره‌ی داخلی را تمیز نماید. مقداری هوای سرد کننده در نوک برای محافظت از صفحه‌ی نوک در برابر گرم شدن بیش از حد مورد نیاز است. به هیچ وجه نباید اجازه داده شود که درجه حرارت نوک از ۹۰۰K

¹⁴ cranklighting

بیشتر شود. به طور کلی، افزایش عمق غوطه‌وری شمع به درون جریان گاز داغ اشتعال‌پذیری آن را بهبود می‌بخشد و عمر آن را کاهش می‌دهد.

در اکثر موتورهای صنعتی، احتراق مشکل بزرگ نمی‌باشد چراکه تاوان عدم روشن شدن بسیار کمتر از موتورهای هواپیما است. یک عمل رایج این است که شمع‌هایی نصب شود که بتوان در زمانی که استفاده نمی‌شوند خارج شوند. این رویکرد مزایای بیشتری دارد چرا که اجازه می‌دهد تا شمع در بهترین موقعیت برای احتراق قرار داده شود، و در عین حال از تمام مشکلات تداخل آیرودینامیکی و عمر شمع اجتناب می‌کند. اگر سوخت موتور یک سوخت تقطیرشده باشد، یک شمع مشعلی استفاده می‌شود که با سوختی از مخزن اصلی تامین می‌شود. در روغن‌های سوخت سنگین، با این حال، یک منبع جداگانه از سوخت‌های گازی تقطیر شده باید به کار گرفته شود [۱۷].

۵-۱- اهداف پژوهش و مروری بر فصل‌های پایان نامه

با توجه به رشد و اهمیت صنایع هوافضا در دنیا، نیاز به تحقیق و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های ساخت و تولید مورد استفاده در این صنایع امری ضروری است. پیشرفت آلیاژهای نیکل، کبالت و تیتانیوم با تاریخ معاصر هوافضا ارتباط تنگاتنگی دارد. بسیاری از آلیاژهای مورد استفاده در صنعت هوافضا در دسته‌ای قرار می‌گیرد که به سوپرآلیاژ معروف است. این آلیاژها خواص مقاومت در برابر حرارت بالا، مقاومت در برابر خوردگی بسیار بالایی دارند. مواد اصلی تشکیل دهنده اکثر سوپرآلیاژها نیکل و یا کبالت می‌باشد. استحکام در برابر حرارت بالا، مقاومت به خزش بالا و عکس‌العمل خوب نسبت به خستگی، انتشار آرام و کند ترک، چقرمگی و مقاومت به اکسایش در حرارت‌های بالا از خصوصیات است که این دسته از مواد در شرایط بحرانی دارند. امروزه در مقیاس وسیعی از سوپرآلیاژها در صنایع مختلف استفاده می‌شود که از جمله آن می‌توان به پره‌های توربین‌های گاز در نیروگاه‌ها و موتورهای جت اشاره کرد. جنس این پره‌ها و قابلیت تحمل آنها در برابر خوردگی و دمای بالا در راندمان نهایی توربین گاز موثر است امروزه سوپرآلیاژهایی که در پره‌های توربین گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توانند دمای 1100°C را تحمل کنند حال اگر بتوان سوپرآلیاژی ساخت که دمای بیشتری را تحمل کند راندمان نیروگاه‌ها و هواپیماهایی که از این توربین‌های گازی استفاده می‌کنند بیشتر

می‌شود و در مقیاس وسیع بسیار ارزشمند است و گاه برای اینکه فقط 20°C این سقف حرارتی را بالا ببرند هزینه‌های زیادی صرف می‌شود. سوپرآلیاژهایی که در توربین گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً با پایه نیکل و از پیچیده‌ترین ترکیبات انواع سوپرآلیاژها هستند. کشورهایی که به تکنولوژی ساخت سوپرآلیاژها دست پیدا می‌کنند عملاً به برتری اقتصادی و استراتژیکی دست خواهند یافت. به علت استفاده گسترده از این فناوری در صنایع نظامی دانش ساخت آن جزء اطلاعات محرمانه است و برای بدست آوردن چنین دانشی نیاز به سرمایه گذاری سنگینی وجود دارد.

در این پایان نامه سعی شده است بر روی ساخت پوسته شمع موتور هوایی که از اهمیت ویژه ای در سیستم احتراق موتورهای هوایی دارد پرداخته شود، برای این امر از شمع اصلی موتور هوایی -J79] 17 استفاده شده است. پوسته شمع مورد استفاده در این تحقیق از ماده سوپرآلیاژهای پایه نیکل ساخته شده است. پایان‌نامه‌ی حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول، مقدمه ای راجع به موتور جت و سیستم شمع آورده شده است. فصل دوم به سوپرآلیاژها و روش‌های شکل دهی آن اختصاص دارد. در فصل سوم به فرآیند ساخت پوسته شمع موتور هوایی و همچنین مدل سازی حرارتی پوسته در نرم افزار آباکوس پرداخته شده است. در فصل چهارم، نتایج به دست آمده و فصل پنجم، نتیجه گیری و پیشنهادهایی برای ادامه ی کار ارائه شده است.

فصل ۲ سوپرآلیاژها و روش‌های شکل‌دهی آن

۱-۲- سوپر آلیاژ

سوپر آلیاژها، آلیاژهای مقاوم به گرما در دمای بالا هستند و قادرند که استحکام خود را در دماهای بالا حفظ نمایند. سوپر آلیاژها همچنین مقاومت خوبی به خوردگی و اکسایش و مقاومت زیادی به خزش و شکست در دمای بالا دارند. سوپر آلیاژ^{۱۵} به آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن - نیکل و پایه کبالت گفته می شود که عموماً در دماهای بالاتر از 540°C استفاده می شوند. سوپر آلیاژهای پایه آهن - نیکل مانند آلیاژ IN-718 از فن آوری فولادهای زنگ نزن توسعه یافته اند. سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت بسته به نوع کاربرد و ترکیب شیمیایی می توانند به صورت ریخته یا کار شده باشند.

از آغاز پیدایش سوپر آلیاژها، تعداد زیادی آلیاژ شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته و تعدادی نیز به عنوان اختراع ثبت شده اند. تعدادی از آنها در طول سالیان گذشته غربال شده و تعدادی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند. سوپر آلیاژهای دارای ترکیب شیمیایی مناسب را می توان با آهنگری و نورد به اشکال گوناگون درآورد. ترکیبهای شیمیایی پر آلیاژتر معمولاً به صورت ریخته گری می باشند. ساختارهای سرهم بندی شده را می توان با جوشکاری یا لحیم کاری بدست آورد، اما ترکیبهای شیمیایی که دارای مقادیر زیادی از فازهای سخت کننده هستند، به سختی جوشکاری می شوند. خواص سوپر آلیاژها را با تنظیم ترکیب شیمیایی و فرآیند (شامل عملیات حرارتی) می توان کنترل کرد و استحکام مکانیکی بسیار عالی در محصول تمام شده به دست آورد [۱۸].

۱-۱-۲ ویژگی ها و خواص سوپر آلیاژها

۱- فولادهای معمولی و آلیاژهای تیتانیوم در دماهای بالاتر از 540°C دارای استحکام کافی نیستند و امکان خسارت دیدن آلیاژ در اثر خوردگی وجود دارد.

۲- چنانچه استحکام در دماهای بالاتر (زیر دمای ذوب) که برای اکثر آلیاژها تقریباً $1204-1371$ مورد نیاز باشد، سوپر آلیاژهای پایه نیکل انتخاب می شوند.

۳- از سوپر آلیاژهای پایه نیکل می توان در نسبت دمایی بالاتری (نسبت به دمای ذوب) در مقایسه با مواد تجاری موجود استفاده کرد. فلزات دیرگداز (نسوز) نسبت به سوپر آلیاژها دمای ذوب بالاتری دارند ولی سایر

¹⁵- superalloy

خواص مطلوب آنها را ندارند و به همین خاطر به طور وسیعی مورد استفاده قرار نمی گیرند.

۴- سوپرآلیاژهای پایه کبالت را می توان به جای سوپرآلیاژهای پایه نیکل استفاده کرد که این جایگزینی به استحکام مورد نیاز و نوع خوردگی بستگی دارد.

۵- در دماهای پایین تر وابسته به استحکام مورد نیاز، سوپرآلیاژهای پایه آهن - نیکل نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت کاربرد بیشتری پیدا کرده اند.

۶- استحکام سوپرآلیاژ نه تنها مستقیماً به ترکیب شیمیایی بلکه به فرآیند ذوب، آهنگری و روش شکل دهی، روش ریخته گری و بیشتر از همه به عملیات حرارتی پس از شکل دهی، آهنگری یا ریخته گری بستگی دارد.

۷- سوپرآلیاژهای پایه آهن - نیکل نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت ارزان تر هستند.

۸- اکثر سوپرآلیاژهای کار شده برای بهبود مقاومت خوردگی دارای مقداری کروم هستند. مقدار کروم در آلیاژهای ریخته در ابتدا زیاد بوده، اما به تدریج مقدار آن کاهش یافت تا عناصر آلیاژی دیگری برای افزایش خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای دما بالا، به آنها افزوده شوند. در سوپرآلیاژهای پایه نیکل با کاهش کروم مقدار آلومینیم افزایش یافت، در نتیجه مقاومت اکسیداسیون آنها در همان سطح اولیه باقی می ماند و یا افزایش می یابد، اما مقاومت در برابر انواع دیگر خوردگی کاهش می یابد.

۹- سوپرآلیاژها در برابر اکسیداسیون مقاومت بالایی دارند اما در بعضی موارد مقاومت خوردگی کافی ندارند. در کاربردهایی مانند توربین هواپیما که دما بالاتر از 760°C است سوپرآلیاژها باید دارای پوشش کافی باشند.

۱۰- فن آوری پوشش دهی سوپرآلیاژها بخش مهمی از کاربرد و توسعه آنها می باشد. نداشتن پوشش به معنی کارایی کم سوپرآلیاژ در دراز مدت و دماهای بالاست.

۱۱- در سوپرآلیاژها به ویژه در سوپرآلیاژهای پایه نیکل بعضی از عناصر در مقادیر جزئی تا زیاد اضافه شده اند. در بعضی از آلیاژها تعداد عناصر کنترل شده موجود تا ۱۴ عنصر و بیشتر می تواند باشد.

۱۲- نیکل، کبالت، کروم، تنگستن، مولیبدن، رنیم، هافنیم و دیگر عناصر استفاده شده در سوپرآلیاژها اغلب گران بوده و مقدارشان در طی زمان متغیر است.

کاربردها :

کاربرد سوپرآلیاژها در دماهای بالا بسیار گسترده و شامل قطعات و اجزاء هواپیما، تجهیزات شیمیایی و پتروشیمی است. اهمیت سوپرآلیاژها در تجارت روز را می‌توان با یک مثال نشان داد. در سال ۱۹۵۰ فقط ۱۰٪ از کل وزن توربین‌های گاز هواپیما از سوپرآلیاژها ساخته می‌شد، اما در سال ۱۹۸۵ میلادی این مقدار به ۵۰٪ رسید. شاید بتوان گسترش بازار سوپرآلیاژها را در دنیا مربوط به صنایع هوا فضا در نظر گرفت که با توجه به رشد روزافزون این صنعت و قطعات یدکی آن در سطح جهان پیش بینی می‌گردد که تنها بازار قطعات یدکی هواپیماها بالغ بر ۴.۵ میلیارد دلار باشد، بررسی‌ها حاکی از آنست که تا سال ۲۰۱۶ تعداد ۱۶۰۰۰ فروند هواپیمای جدید با موتورهای توربین گازی وارد بازار میشوند که نیمی از وزن این موتورها از جنس سوپرآلیاژ خواهد بود .

۲-۱-۲ خواص سوپرآلیاژها

استحکام‌دهی سوپرآلیاژها توسط سخت کاری محلولی (تداخل اتم‌های جانشینی همراه با تغییر شکل)، کار سختی (انرژي نهان ناشی از تغییر شکل) و رسوب سختی (تداخل رسوب‌ها همراه با تغییر شکل) افزایش می‌یابد. همچنین ایجاد کاربیدها (توزیع مناسب از تداخل فازهای ثانویه به همراه تغییر شکل) به ویژه در سوپرآلیاژهای پایه کبالت افزایش استحکام را در پی دارد. استحکام یک عبارت نسبی است و توسط نوع آن تعریف می‌شود. بعضی از کاربردها به استحکام تسلیم و بعضی به استحکام نهایی نیاز دارند (خواص کوتاه مدت). در بعضی دیگر از کاربردها استحکام گسیختگی خزش اهمیت دارد (خواص بلند مدت). استحکام گسیختگی خزش سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه آهن – نیکل در دماهای بالاتر از 650°C بطور قابل ملاحظه ای نسبت به سوپرآلیاژهای پایه کبالت پایین تر است [۱۹].

۲-۲- سوپرآلیاژهای پایه آهن

سوپرآلیاژهای پایه آهن نشأت گرفته از فولادهای زنگ نزن آستینیتی می‌باشند که دارای زمینه‌ای از محلول جامد آهن و نیکل بوده و برای پایداری زمینه نیاز به حداقل ۲۵٪ نیکل است. گروه‌های متعددی از این آلیاژها تاکنون مشخص گردیده‌اند که هر یک با مکانیزم‌های خاصی مستحکم می‌-

شوند. برخی از این آلیاژها نظیر V ۵۷ و A ۲۸۶ حاوی ۲۵ تا ۳۵ درصد وزنی نیکل می‌باشند و استحکامشان به دلیل حضور آلومینیوم و تیتانیوم می‌باشد.

گروه دوم آلیاژهای پایه آهن که آلیاژهای X750 و Incoloy901 نمونه‌های آن می‌باشند، حداقل ۴۰٪ وزنی نیکل داشته و همانند گروه‌های با نیکل بالاتر استحکام بخشی توسط سختی رسوبی صورت می‌گیرد.

گروه دیگر این آلیاژها بر پایه آهن- نیکل- کبالت می‌باشند و استحکام این گروه در محدوده 650°C مناسب بوده و ضریب انبساط حرارتی آنها پایین می‌باشد. این آلیاژها شامل Incoloy با شماره‌های ۹۰۳، ۹۰۷، ۹۰۹، 1-1- Pyromet CTX و 3- Pyromet CTX و غیره می‌باشند.

۲-۳- سوپرآلیاژهای پایه کبالت

سوپرآلیاژهای کارپذیر پایه کبالت برخلاف سایر سوپرآلیاژها مکانیزم استحکام بخشی متفاوتی دارند و خواص حرارتی خوبی در دمای حدود 1000°C خواهند داشت.

سوپرآلیاژهای پایه کبالت حاوی کرم، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوبی داشته و هم چنین قابلیت جوشکاری و مقاومت به خستگی حرارتی آنها نسبت به آلیاژهای پایه نیکل بالاتر می‌باشد. از طرف دیگر امکان ذوب و ریخته‌گری این آلیاژ، در هوا با اتمسفر آرگون مزیت دیگری نسبت به سایر سوپرآلیاژها که نیاز به خلاء دارند می‌باشد.

سه گروه اصلی آلیاژهای پایه کبالت را می‌توان به صورت ذیل در نظر گرفت :

آلیاژهایی که در دماهای بالا در محدوده 650°C تا 1150°C مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل آلیاژهای S-816، 25HAYNES، 188 25HAYNES، 55625HAYNES، 50UMCO و آلیاژهایی که تا حدود 650°C به کار می‌روند نظیر TN3MP، 159 MP و آلیاژ مقاوم به سایش B 6 Stellite می‌باشند.

آلیاژ ۲۵۲۵ HAYNES بیشترین کاربرد را در میان آلیاژهای کارپذیر پایه کبالت داشته است و در ساخت قطعات گرمکار نظیر توربین‌های گازی، اجزاء راکتورهای هسته‌ای، ایمپلنت‌های جراحی و غیره

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آلیاژهای گروه پایه کبالت که شامل کرم- تنگستن- کربن می‌باشند معروف به آلیاژهای Satellite بوده که به شدت مقاوم به سایش می‌باشند.

این گروه معمولاً در مواردی که مقاومت سایشی در درجه حرارت‌های بالا مورد نیاز باشد به کار می‌روند. در واقع سختی این مواد در دمای بالا حفظ شده و در مواقعی که نمی‌توان در حین کار روغنکاری انجام داد به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۴- سوپرآلیاژ پایه نیکل

ترکیب شیمیایی و نقش عناصر مختلف در سوپرآلیاژهای پایه نیکل

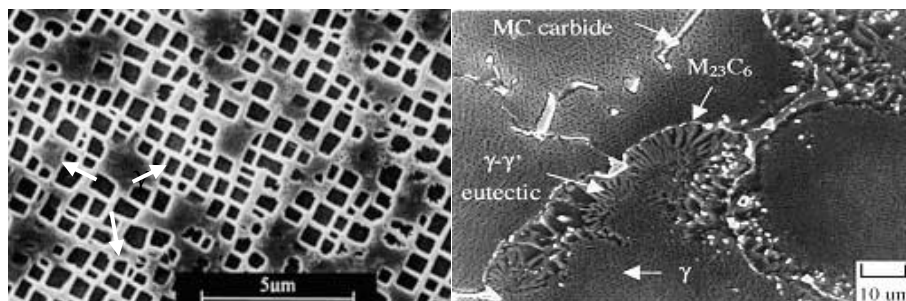
سوپرآلیاژهای پایه نیکل، قابلیت کاربرد در شرایط درجه حرارت‌های بالا و تنش‌های زیاد را مرهون وجود عناصری نظیر Mo, Ta, W, Cr, Ni, Co, Nb, Al, Ti و... هستند که با ایجاد ترکیب‌ها و فازهای ثانویه‌ی ویژه در آلیاژها، خواص منحصر به فردی را برای سرویس دمای بالا ایجاد می‌کنند.

در ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژهای پایه نیکل، سه گروه از عناصر مشاهده می‌شود. گروه اول شامل عناصری می‌باشد که تشکیل دهنده فاز زمینه γ هستند. عنصر اصلی فاز زمینه γ ، نیکل بوده و عناصر گروه V, VI, VII جدول تناوبی نظیر Fe, W, Mo, Cr و Co به صورت محلول جامد در نیکل قرار می‌گیرند. گروه دوم شامل عناصری است که به صورت ترکیب Ni_3X رسوب γ' را تشکیل می‌دهند. این عناصر از گروه‌های III, IV و V جدول تناوبی بوده و عبارتند از Al, Ti, Nb, Ta, Hf. گروه سوم نیز عناصری هستند که تمایل به جدایش به مرزخانه‌ها دارند. این عناصر از گروه‌های II, III و IV و شامل B, C و Zr هستند. علاوه بر سه گروه اصلی مذکور، دو زیر گروه از عناصر نیز وجود دارد که عبارتند از: W, Mo, Cr و Cb که در ترکیب کاربیدها شرکت می‌کنند و Al و Cr نیز اکسیدها را تشکیل می‌دهند.

۲-۴-۱ بررسی ریز ساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل

فازهای اصلی موجود در ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل عبارتند از فاز زمینه (γ)، رسوبات گاما پرایم (γ')، کاربیدها، γ' مرزخانه‌ای و برایندها. لازم به توضیح است که در تمامی سوپرآلیاژهای پایه نیکل که در معرض درجه حرارت‌های بالا کار می‌کنند، ترکیب شیمیایی فازهای موجود در ساختار،

ثابت نبوده و دائماً با یک‌دیگر اندرکنش دارند و در دمای محیط فقط یک ساختار لحظه‌ای از آلیاژ پایدار بوده و همان مورد مشاهده، آنالیز و گزارش قرار می‌گیرد [۲۰].



شکل ۲-۱: ریز ساختار یک سوپرآلیاژ پایه نیکل

(۲) تقسیم بندی سوپرآلیاژهای نیکل بر حسب ترکیب شیمیایی:

- ۱-آلیاژهای با Mo بالا
- ۲-آلیاژها با Ni-Cr(75-15)
- ۳-آلیاژها با Ni-Cr(75-20)
- ۴-آلیاژها با Ni(35-60),Cr-Co(20-20)
- ۵-آلیاژها با درصد مختلف از Ni,Cr,Co,Mo
- ۶-آلیاژهای اصلاح شده گروه پنج با کبالت کمتر
- ۷-آلیاژهای اصلاح شده گروه پنج با آهن بیشتر و کبالت کمتر
- ۸-آلیاژهای اصلاح شده گروه یک با آهن زیاد و مولیبدن کم

۲-۴-۲ سوپرآلیاژ هستلوی ایکس

هستلوی ایکس^{۱۶} در گروه سوپرآلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با محلول جامد قرار دارد. ریز ساختار این آلیاژ شامل یک زمینه آستنیتی است که ذرات ریز کاربید در این زمینه توزیع شده‌اند. شبکه مکعبی با FCC، BCC در برگیرنده ساختار بلوری اکثر آلیاژها هستند. اگر شبکه تتراگونال نیز به این فهرست اضافه شود، ساختار سوپرآلیاژها به استثنای فازهای پیچیده‌ای مانند دلتا و سیگما به

¹⁶ hastelloy x

سهولت نشان داده خواهد شد. کاربیده‌های Bcc از نوع MC، M23C6، M6C و M7C3 یکی از فازهای ثانویه کنترل کننده خواص این آلیاژ به شمار می‌آیند. از آنجایی که این سوپرآلیاژ استحکام خود را توسط سخت کننده‌های محلول جامد بدست می‌آورند، فازهای رسوبی استحکام دهنده اصلی γ' ، γ'' در ساختار آن یافت نمی‌شود. در ساختار این آلیاژ بطور مستقیم (به مقدار محدود) و یا بطور غیر مستقیم و با تقویت مرزدانه و جلوگیری از حرکت برشی، استحکام را بهبود می‌بخشند. میزان تاثیرگذاری کاربیدها در بهبود استحکام بستگی به نوع آلیاژ و فرآیند دارد. فازهای δ و η در طول فرآیند تولید از نظر کنترل ساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل و آهن – نیکل کار شده مفید هستند. علاوه بر عناصر سخت کننده محلول جامد و کاربیدزا، عناصر دیگری نظیر بر به منظور افزایش خواص مکانیکی یا شیمیایی به این سوپرآلیاژ افزوده شده است. بوریدها نیز رسوبات دیگری هستند که چنانچه جدایش بور در مرزدانه وجود داشته باشد، شکل می‌گیرند. فازهای مضر نیز در سوپرآلیاژها تشکیل می‌شود که از میان آنها می‌توان به فازهای σ ، μ و Laves اشاره نمود. این فازها دارای ساختار بلوری فشرده هستند که در صورت جزئی بودن مورد مطالعه قرار نمی‌گیرند ولی اگر مقدار آنها افزایش یابد بسیار مضر هستند [۲۱].

۲-۴-۳ سوپرآلیاژهای اینکونل

آلیاژهای اینکونل^{۱۷}، خانواده‌ای از سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل هستند که محدوده وسیعی از ترکیبها و خواص را در بر می‌گیرند. برخی از آلیاژهای این گروه، مانند سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ که دارای فازهای رسوبی است، در گذشته جزو گروه پایه آهن- نیکل بشمار می‌رفتند ولی امروزه در گروه سوپرآلیاژهای پایه نیکل قرار می‌گیرند. سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸، یک آلیاژ رسوب سخت شونده است که علاوه بر آهن و نیکل حاوی مقادیر قابل توجهی کرم، نیوبیم و مولیبدن می‌باشد. همچنین عناصر جزئی مانند آلومینیم و تیتانیم در ترکیب این آلیاژ وجود دارد.

¹⁷ inconel

اینکونل‌های مختلف دارای رنج گسترده ای از عناصر دیگر نیز می‌باشند، ولی به طور کلی نیکل و کروم جز اصلی تمام آنها هستند [۲۲]. در جدول زیر آنالیز شیمیایی چند نوع آلیاژ اینکونل را مشاهده می‌نمایید:

جدول ۱-۲: ترکیب شیمیایی اینکونل

Inconel	Element % by mass														
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu	Al	Ti	Si	C	S	P	B
۶۰۰	۷۲.۰	-۱۴.۰ ۱۷.۰	-۶.۰ ۱۰.۰				۱.۰	۰.۵			۰.۵	۰.۱۵	۰.۰۱۵		
۶۱۷	-۴۴.۲ ۵۶.۰	-۲۰.۰ ۲۴.۰	۳.۰	-۸.۰ ۱۰.۰		-۱۰.۰ ۱۵.۰	۰.۵	۰.۵	-۰.۸ ۵.۱	۰.۶	۰.۵	۰.۱۵	۰.۰۱۵	۰.۰۱۵	۰.۰۰۶
۶۲۵	۵۸.۰	-۲۰.۰ ۲۳.۰	۵.۰	-۸.۰ ۱۰.۰	-۳.۱۵ ۴.۱۵	۱.۰	۰.۵		۰.۴	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۰۱۵	۰.۰۱۵	
۶۹۰	۵۹.۵	۳۰	۹.۲				۰.۳۵	۰.۰۱	۰.۰۲		۰.۳۵	۰.۰۱۹	۰.۰۰۳		
۷۱۸	-۵۰.۰ ۵۵.۰	-۱۷.۰ ۲۱.۰	balance	-۲.۸ ۳.۳	-۴.۷۵ ۵.۵	۱.۰	۰.۳۵	-۰.۲ ۰.۸	-۰.۶۵ ۱.۱۵	۰.۳	۰.۳۵	۰.۰۸	۰.۰۱۵	۰.۰۱۵	۰.۰۰۶

۴-۴-۲ خواص اینکونل

آلیاژهای اینکونل موادی بسیار مقاوم به اکسیداسیون و خوردگی هستند که برای کار در محیط‌های تحت فشار و انرژی بالا بسیار مناسب هستند. در درجه‌های حرارت بالا، روی سطح اینکونل لایه مقاوم، پایدار و غیر فعال از اکسید تشکیل می‌شود که از خوردگی بیشتر جلوگیری می‌کند. اینکونل در محدوده وسیعی از دماها مستحکم باقی می‌ماند. این آلیاژ در جاهایی که به کار بردن آلومینیوم و فولاد به دلیل احتمال خزش در دماهای بالا قابل استفاده نیستند، به کار می‌رود. استحکام دما بالای اینکونل بسته به نوع آن، مربوط به استحکام دهی محلول جامد یا استحکام دهی رسوبی است.

۴-۴-۳ کاربرد اینکونل

- شیرآلات و اتصالات فشار بالای تانکرها

- راکتورها، صنایع پتروشیمی، صنایع متصاعد کننده گازهای H_2S و CO_2
- صنایع خودروسازی، صنایع اسلحه سازی، صنایع هوایی
- رایج در ساخت تیغه‌های توربین‌های گازی
- محفظه ی احتراق در موشک جت یا توربین
- هواپیمایی شمال امریکا پوسته‌ی راکت X-15 را از اینکونلی به نام "Inconel X" ساخته است [۲۳].

۲-۴-۶ آلیاژهای اینکونل

- Inconel 600: استحکام دهی محلول جامد
- Inconel 625: مقاوم به اسید، قابلیت جوشکاری خوب
- Inconel 690: مقادیر کم کبالت برای کاربردهای هسته ای و مقاومت ویژه کم
- Inconel 718: استحکام دهی فاز گاما دبل پرایم همراه با قابلیت جوشکاری خوب
- Inconel 751: محتوای آلومینیوم افزایش یافته برای بهبود استحکام شکست در دمای $1600^{\circ}F$
- Inconel 792: محتوای آلومینیوم افزایش یافته برای بهبود خواص خوردگی دما بالا (استفاده در توربین‌های گازی)

۲-۴-۷ اینکونل ۶۰۰

اینکونل ۶۰۰ آلیاژی بر پایه نیکل با مقاومت عالی به کربوریزاسیون و اکسیداسیون در دماهای بالاست. این آلیاژ مدت طولانی است که در صنایع عملیات حرارتی استفاده می‌شود و کاربردهایی مشابه RA330 دارد. آلیاژ ۶۰۰ مقاومت خوبی به کلر خشک و گاز HCl در دماهای بالا دارد. این آلیاژ بخاطر مقادیر بالای نیکل برای دماهای بالا در حضور سولفور پیشنهاد نمی‌شود.

رده‌های ۲۰۰ و ۲۰۱ نیکل معمولاً برای تحمل شرایط بازی غلیظ دمای بالا مرجح هستند. ولی زمانیکه ترکیبات سولفور هم حضور داشته باشند، یا در حضور هیدروکسید آمونیوم، آلیاژ

۶۰۰ پیشنهاد داده می‌شود. آلیاژ ۶۰۰ در مواد سوزاننده بازی غلیظ و داغ مورد خوردگی در اثر تنش (SCC) قرار می‌گیرد. برای ممانعت از خوردگی در اثر تنش، ساخت آلیاژ باید بگونه ای باشد که قبل از استفاده کاملاً تنش زدایی شده باشد. حداقل یک عملیات ۱ ساعته در دمای ۱۶۵۰°F پیشنهاد می‌شود، ولی دمای ۱۸۰۰°F تا ۱۸۵۰°F به مدت ۱ ساعت ترجیح داده می‌شود.

در رشته ی هوانوردی اینکونل ۶۰۰ را در جاهای مختلف موتور و بدنه ی هواپیما جایی که بیشترین دما را متحمل می‌شود استفاده می‌کنند. برای مثال در اگزوز هواپیما.

این آلیاژ یکی از قطعات استاندارد در ساخت هسته ی راکتور می‌باشد. این آلیاژ مقاومت بسیار بالایی در برابر خوردگی آب با خلوص بالا دارد [۲۴].

۸-۴-۲ مشخصات فنی

AMS 5540, AMS 5665

ASME SB 166, ASME SB 167, ASME SB 168

ASTM B 166, ASTM B 167, ASTM B 168

EN 2.4816

UNS N06600

۹-۴-۲ نام‌های مرسوم تجاری

Nickel 600, Inconel 600 , Alloy 600

۱۰-۴-۲ ویژگی‌ها

- تقریباً مصون از خوردگی تحت اثر تنش (SCC) در محیط حاوی یون‌های کلر
- مقاومت خوب به خوردگی مواد بازی
- مقاوم نسبت به کلر خشک تا دمای ۱۰۰۰ °F
- مقاومت به اکسیداسیون تا دمای ۲۰۰۰ °F
- مقاومت نسبت به کربوریزه شدن

۲-۵- ساخت و تولید قطعات سوپرآلیاژی

قطعات سوپرآلیاژی کاربردهای متنوع و وسیعی در صنایع مختلف از جمله ایمپلنت‌ها^{۱۸}، صنایع زیردریایی، هوافضا و غیره دارند، اما کاربرد عمده‌ی سوپرآلیاژها، در پره‌های توربین‌های گازی است. ساخت پره‌های این توربین‌ها نیاز به توانایی بالایی از لحاظ تکنولوژی و دانش فنی دارد.

۲-۶- روش‌های شکل‌دهی قطعات سوپرآلیاژ

قطعات سوپرآلیاژی، به دو روش عمده تولید می‌شوند:

الف) روش ریخته‌گری دقیق: این روش، عمدتاً برای تولید پره‌های ثابت و متحرک توربین استفاده می‌شود. به این دسته از محصولات، "قطعات سوپرآلیاژی ریختگی"^{۱۹} می‌گویند.

ب) روش شکل‌دهی: این روش، شامل فرآیندهایی چون فورج و نورد است و محصولات آن از قبیل دیسک، ورق، میل‌گرد، لوله و مفتول می‌باشد. به این گروه از محصولات، "قطعات سوپرآلیاژی کارپذیر"^{۲۰} گفته می‌شود [۲۵].

۲-۶-۱ ریخته‌گری دقیق

تولید قطعات سوپرآلیاژی به روش ریخته‌گری

برای تولید یک قطعه سوپرآلیاژی به روش ریخته‌گری، به خصوص پره توربین که مهم‌ترین قطعه سوپرآلیاژی است، چهار مرحله باید انجام شود:

- مهندسی معکوس (جهت تهیه نقشه و مشخصات فنی)
- ساخت قالب و ریخته‌گری دقیق
- ماشین‌کاری قطعات ریخته شده
- پوشش‌دهی

¹⁸ implant

¹⁹ cast superalloy

²⁰ wrought super alloy

این چهار مرحله برای تولید پره، به خصوص پره‌های متحرک ردیف اول و دوم باید انجام شوند. البته پره‌های ثابت ممکن است بخش پوشش‌دهی را نداشته باشند. همچنین پره‌های متحرک در ردیف‌های سوم و بالاتر در بعضی موتورها، ممکن است از طریق فرایند فورجینگ تولید شده و پوشش نداشته باشند.

مهندسی معکوس

در اینجا منظور از مهندسی معکوس فرایندی است که در آن از تعدادی نمونه موجود، مشخصات فنی و نقشه‌های مورد نیاز برای تولید و ساخت نمونه‌های مشابه بدست می‌آید. این فرایند شامل اندازه‌گیری‌های ابعادی به وسیله CMM ۲۱ و دستگاه‌های مخصوص دیگر و سپس تهیه نقشه می‌باشد.

مشکلی که در تولید پره‌های توربین وجود دارد، این است که پره، محصول نهایی نیست بلکه محصول نهایی "توربین" است و پره‌ها باید طوری دقیق ساخته شوند، تا وقتی تعداد زیادی پره در توربین نصب می‌شود، شرایط لازم را ایجاد نماید. ممکن است قطعه تولید شده چیزی شبیه به پره اصلی باشد، اما رعایت تلورانس‌های مجاز، بالاخص در نقاط حساس پره، نیازمند تجربه و دقت کافی است. تلورانس‌های قسمت‌های مختلف پره بالاخص در نقاط حساس، بر توان خروجی موتور به ویژه در موتورهای هوایی تاثیر تعیین کننده‌ای دارد.

ریخته‌گری دقیق

در ریخته‌گری دقیق، ابتدا قالب موم ساخته شده و سپس قطعات از جنس موم تزریق شده و پس از مونتاژ روی خوشه مومی پوسته سرامیک ایجاد می‌شود. در مرحله بعد موم تبخیر شده و پوسته سرامیکی به عنوان قالب عمل کرده و ریخته‌گری انجام می‌گردد.

موضوع حایز اهمیت این است که در فرایند ریخته‌گری، پارامترهای بسیاری از جمله پارامترهای محیطی مثل رطوبت، دما و غیره دخیل است که تجهیزات خاصی را جهت کنترل نیاز دارد. در شرکت‌های معتبر این پارامترها از طریق سیستم کنترل مرکزی تنظیم می‌شوند.

²¹ - coordinate measuring machine

البته برای تولید قطعات ساده و با ضخامت‌های زیاد (توربین‌های قدیمی و صنعتی) که از نظر تلورانس‌های ابعادی حساسیت کمتری دارند، مشکل چندان وجود ندارد. اما در مورد قطعات نازک و قطعات ماهیچه خور و سوراخ‌دار، پیچیدگی‌ها و حساسیت‌های خاص وجود دارد.

ماشینکاری

قطعات سوپرآلیاژی بعد از ریخته‌گری باید ماشین‌کاری شوند که نقشه‌ها و دستورالعمل‌های لازم از طریق مهندسی معکوس آماده می‌شود. ماشین‌کاری سوپرآلیاژها، ابزار مربوط به خود را نیاز دارد. سوپرآلیاژها و به خصوص آنهایی که ریخته‌گری می‌شوند، دارای سخت زیاد و استحکام بالا می‌باشند [۲۶].

۲-۶-۲ آهنگری سوپرآلیاژها

آهنگری سوپرآلیاژهای اولیه خیلی مشکل نبود، ولی به زودی مشخص گردید که به خاطر استحکام بالای سوپرآلیاژها در دماهای بالا آهنگری آنها دشوارتر از فلزات دیگر است. این موضوع به ویژه پس از وارد شدن سوپرآلیاژهای پیر سخت شده به بازار بیشتر مشخص شد. سوپرآلیاژهای آهن - نیکل اولیه توسعه یافته فن‌آوری فولاد زنگ‌نزن بودند، ولی با ورود سوپرآلیاژهای پیر سخت شده، استحکام در دمای بالا به نحو چشمگیری افزایش یافت و استحکام و سفتی این سوپرآلیاژهای جدید، آهنگری آنها را دشوار ساخت.

واقعیت این است که بعضی از سوپرآلیاژهای پایه آهن مانند A-286 از نظر قابلیت آهنگری شبیه فولادهای زنگ نزن آستنیتی هستند، ولی آهنگری ن سوپرآلیاژها عموماً دشوارتر از فولادهای زنگ نزن است. بعضی از سوپرآلیاژها واقعاً به قدری در دماهای آهنگری محکم هستند، که آنها را نمی‌توان به وسیله روش‌های آهنگری معمولی شکل داد. در این موارد آلیاژ با استفاده از ریخته‌گری یا متالورژی پودر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۶-۳ متالورژی پودر سوپرآلیاژها

روش متالورژی پودر (P/M) به طور گسترده ای در تولید سوپرآلیاژها استفاده می‌شود. این روش در شرایط عادی فقط برای سوپرآلیاژهای پایه نیکل به کار برده می‌شود. کاربرد اصلی محصولات

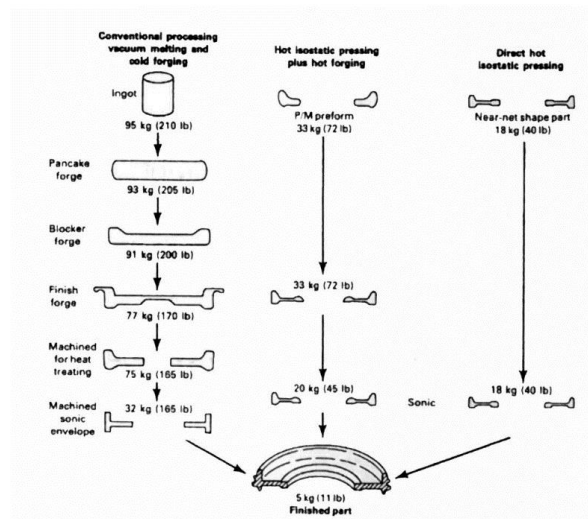
متالورژی پودر در دیسک‌های استحکام بالای توربین از جنس سوپرآلیاژهایی مانند IN-100 یا Rene 95 است که آهنگری آنها به روش‌های سنتی دشوار یا غیرعملی است. استفاده از روش متالورژی پودر برای آلیاژهای استحکام یافته با توزیع اکسید (ODS) دارای محدودیت است.

متالورژی پودر آلیاژهای سخت شده با γ' مزیت‌هایی مانند ساختار همگن، شمش‌های دانه ریز و امکان ایجاد شکل اولیه در آلیاژهای پایه نیکل پرآلیاژ را دارا می‌باشد. عموماً فرآیند متالورژی شمش سنتی در همگن بودن زمینه و ریزدانه بودن محصول قادر به رقابت با متالورژی پودر نیست.

فرآیندهایی که بتوانند شکل نهایی یا نزدیک به آن را تولید کنند، به دلیل کاهش وزن مواد خام اولیه و کاهش هزینه عملیات ماشینکاری ثانویه، هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهند. همچنین در فرآیند متالورژی پودر کنترل دقیق تر ریزساختار قطعه نسبت به قطعات ریخته و کار شده امکان پذیر است. (شکل ۲-۲) کاهش وزن مواد اولیه مصرفی به هنگام تولید قطعه دیسک کمپرسور توربین گاز به روش متالورژی پودر، پرس گرم ایزواستاتیک (HIP، فشردن گرم همبار) و آهنگری، پرس گرم ایزواستاتیک مستقیم برای ایجاد شکل نیمه تمام را نشان می‌دهد. کاهش وزن مواد خام به روش متالورژی پودر انتخاب شده و پیچیدگی قطعه بستگی دارد، ولی برای کاهش هزینه موارد ذیل را باید در نظر داشت :

- افزایش هزینه آلیاژ در متالورژی پودر نسبت به شمش
- افزایش هزینه نگهداری و حمل و نقل پودر نسبت به شمش
- کاهش هزینه‌های ماشینکاری محصولات پودر نسبت به شمش
- کاهش وزن موارد اولیه

یادآوری این موضوع اهمیت دارد که فرآیندهای متالورژی پودر به نحو قابل ملاحظه ای تعداد مراحل فرآیند کمتری دارند و وزن مواد ورودی گاهی از ۹۵ kg به ۱۸ kg کاهش می‌یابد. علیرغم کاهش وزن ماده خام و هزینه ماشینکاری قیمت قطعات متالورژی پودر عموماً بالاتر از قیمت قطعات متالورژی شمش سنتی است و به همین خاطر قطعات متالورژی پودر فقط در مواردی استفاده می‌شوند که نتوان آن را با شمش تولید کرد.



شکل ۲-۲- مراحل فرآیند تولید دیسک کمپرسور توربین به روش متالورژی پودر و کاهش وزن اولیه در این روش در مقایسه با روش تولید سنتی

۲-۶-۴ ماشینکاری سوپرآلیاژها

در ساخت قطعات سوپرآلیاژها از ماشینکاری استفاده می‌شود و بر روی هر قطعه ای به تعدادی مراحل ماشینکاری نیاز است. ماشینکاری سوپرآلیاژها در مقایسه با فولادها پر هزینه تر است. پیشرفت موجود در تولید قطعات نیمه تمام روش‌های ریخته گری دقیق، آهنگری دقیق و متالورژی پودر توانسته‌اند مشکلات و هزینه‌های ماشینکاری سوپرآلیاژها را کاهش دهند.

با وجود پیشرفت‌های انجام شده در زمینه تولید قطعات نیمه تمام، ماشینکاری همچنان نقش مهمی در ساخت قطعات سوپرآلیاژها ایفا می‌کند. بخش زیادی از هزینه‌های ماشینکاری سوپرآلیاژها به خاطر سرعت برشکاری آنها است که در حدود ۵٪ تا ۱۰٪ سرعت برشکاری فولادها می‌باشد. شرایط سطحی قطعه ماشینکاری شده نقش مهمی در خواص مکانیکی سوپرآلیاژ دارد. در نتیجه فرآیند ماشینکاری نه تنها از نظر سهولت و هزینه براده برداری بلکه از نظر اثرات آنها بر رفتار سوپرآلیاژها به هنگام قرار گیری تحت تنش‌های متناوب مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

روش‌های ماشینکاری

اکثر روش‌های ماشینکاری معمولی را می‌توان در سوپرآلیاژها به کار برد. این روش‌ها عبارتند از : تراشکاری، سنگ‌زنی، فرزکاری، خان‌زنی و سوراخکاری. فرآیندهای براده برداری دیگری که در

سوپرآلیاژها مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از : صفحه تراشی، پیچ تراشی، داخل تراشی، دنده‌زنی و حدیده‌کاری. تراشکاری بیشترین فرآیند مورد استفاده در ماشینکاری سوپرآلیاژها است. روش‌های معمول ماشینکاری سرعت براده برداری و حذف فلز بیشتری نسبت به فرآیندهای غیرمعمول نظیر ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM) دارند و به همین دلیل کاربرد زیادی در ماشینکاری سوپرآلیاژها پیدا کرده‌اند.

عوامل مؤثر بر خواص ماشینکاری سوپرآلیاژها عبارتند از :

- استحکام در دماهای بالا
 - استحکام برشی دینامیکی بالا
 - وجود کاربیدهای سخت که سوپرآلیاژها را ساینده می‌کنند.
 - کار سخت شده در طی برشکاری
 - پایین بودن ضریب انتقال حرارت سوپرآلیاژها که باعث افزایش دما نوک ابزار می‌شود.
 - تشکیل شدن براده پیوسته و چقرمه در طی برشکاری
- متأسفانه اکثر روش‌های معمول برای بهبود قابلیت ماشینکاری در سوپرآلیاژها مؤثر واقع نمی‌شوند. اصلاح آلیاژ و عملیات حرارتی به خاطر اثرات مضر که می‌توانند روی خواص مکانیکی داشته باشند، عموماً مؤثر نیستند. ماشینکاری در دمای بالا تا حدودی می‌تواند قابلیت ماشینکاری را بهبود بخشد، اما پرهزینه است و مشکلات دیگری نیز دارد. یکی از راه حل‌های ارائه شده، استفاده از فرآیندهای الکتریکی در ماشینکاری قطعات است. پس از به کار گیری این روش جدید مشخص شد که روش‌های ماشینکاری قدیمی تنش‌های باقیمانده مفیدی روی سطح قطعات ماشینکاری شده ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال در آلیاژهای پایه نیکل ماشینکاری شده به روش الکتروشیمیایی دیده شده است که استحکام خستگی به خاطر حذف تنش‌های فشاری سطحی در حدود ۵٪ کاشه می‌یابد. با توجه به این موضوع روش‌های ماشینکاری، سرعت‌های براده برداری و هزینه‌های مربوطه با در نظر گرفتن خواص نهایی، مزایا و معایب یک فرآیند انتخاب می‌شوند [۲۷].

ماشینکاری به وسیله تخلیه الکتریکی

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشینکاری مخصوص برای شکل‌دهی قطعات هادی جریان الکتریسیته است. در این روش ابزار با قطعه کار تماس نداشته و سختی قطعه کار نیز بر سرعت ماشینکاری تاثیری ندارد. بنابراین می‌توان این روش را در ماشینکاری مواد سخت نظیر سوپرآلیاژها به کار گرفت [۲۸].

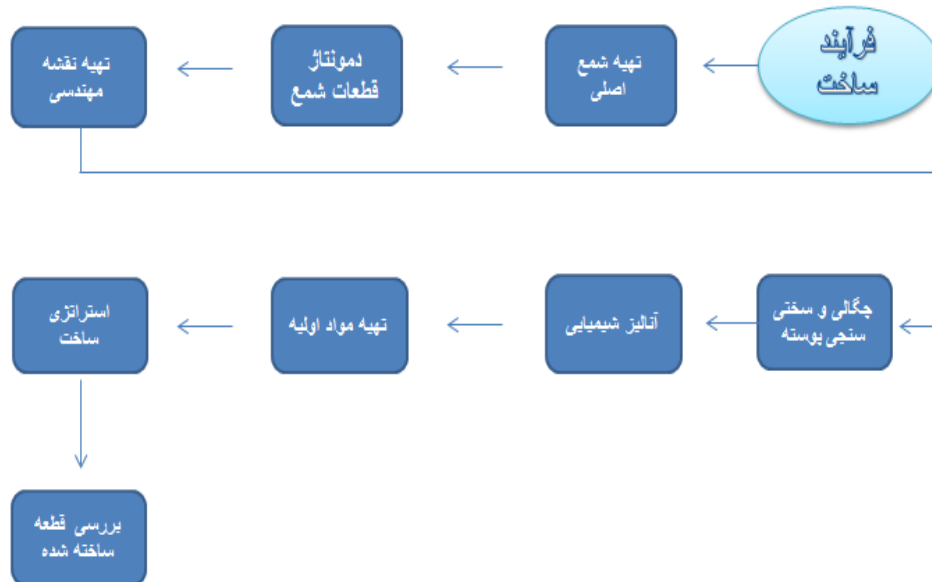
۷-۲- ماشینکاری پوسته شمع موتور هوایی

به صورت عمده سوپرآلیاژها را به صورت ریخته‌گری دقیق و بعضاً ماشینکاری دقیق شکل می‌دهند. ریخته‌گری دقیق برای تولید انبوه و نیمه انبوه روشی مقرون به صرفه و مرسوم در مورد قطعات سوپرآلیاژ پایه‌ی نیکل می‌باشد. این روش امکان تکرار تولید قطعات با دقت ابعادی و صافی سطح یکنواخت را می‌دهد و می‌توان قطعاتی را تولید کرد که به پرداخت سطحی و عملیات تکمیلی نیازی نداشته باشد. برای ساخت پوسته‌ی شمع به این روش نیاز به هزینه‌ی اولیه برای ساخت قالب‌های فلزی تزریق موم و تزریق ماهیچه‌ی سرامیکی می‌باشد. به دلیل تیراژ پایین قطعه و برای اجتناب از هزینه‌های زیاد این روش در تیراژ پایین، می‌توان پوسته‌ی شمع مورد نظر را با ماشینکاری میل‌گرد سوپرآلیاژ تولید نمود. در این روش برای ساخت تعداد محدود، با توجه به هندسه‌ی قطعه، دورریز مواد تقریباً برابر با مقدار دورریز در تولید به روش ریخته‌گری دقیق خواهد بود. همچنین هزینه‌های قالب موم و ماهیچه و سایر هزینه‌های ریخته‌گری حذف می‌شود. در عوض حجم ماشینکاری زیادی باید انجام شود تا ابعاد مورد نظر حاصل شود. برای ماشینکاری باید از میل‌گرد اکسترود شده‌ی سوپرآلیاژ استفاده نمود که نسبت به شمش آن هزینه‌ی بالاتری دارد. در ماشینکاری سوپرآلیاژ پایه نیکل، با توجه به استحکام بالای ماده، نیاز به استفاده از ابزارهای خاص کاربریدی است. در ضمن عمر ابزار در ماشینکاری این مواد محدود خواهد بود. با توجه به هندسه‌ی قطعه، در صورت استفاده از روش ماشینکاری برای ساخت، استفاده از روش جرقه (اسپارک) برای ماشینکاری برخی قسمت‌ها اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد.

فصل ۳ فرآیند ساخت پوسته شمع

۳-۱- شمع اصلی موتور هوایی J79-17

در این پروژه بر روی ساخت پوسته فلزی شمع موتور جت جنگنده فانتوم کار شده است. چارت زیر مراحل انجام فرآیند ساخت را نشان می‌دهد (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- فرآیند ساخته پوسته شمع

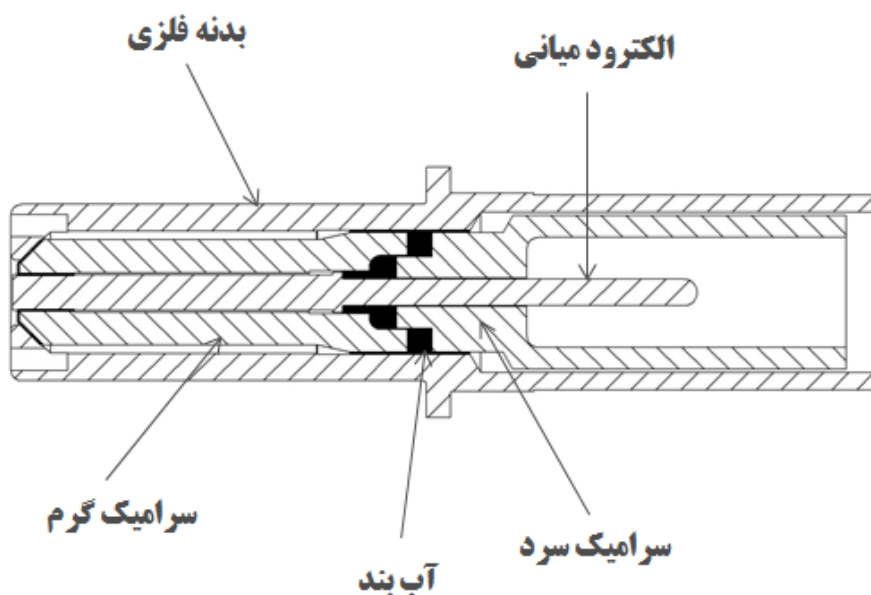
ابتدای امر نمونه ای از شمع مورد نظر جهت مهندسی معکوس تهیه شده و از نظر سلامت مورد بررسی قرار گرفته تا در مراحل تهیه نقشه مشکلی ایجاد نشود، باید دقت داشت که موتور جت J79-17 دارای ۳ شمع مختلف است. شمع مورد نظر شمع اصلی (شکل ۳-۲) نام دارد.



شکل ۳-۲- شمع اصلی موتور جت فانتوم J79-17

۲-۳- دمونتاز قطعات شمع

پس از تهیه نمونه شمع اصلی ابتدا نقشه اولیه قطعه تهیه شده سپس قطعات دیگر شمع از پوسته آن جدا شده است. قسمت‌های اصلی این شمع پوسته بیرونی، عایق‌های سرامیکی، الکتروود مرکزی و چسب سرامیکی می‌باشد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳- شمع محافظی احتراق و اجزای آن

باید توجه کرد در فرآیند جداسازی به قطعات داخلی آسیبی نرسد زیرا که در فرآیند ساخت کل شمع از اهمیت ویژه ای برخوردار است. ابتدا شمع را به گیره بسته و با استفاده از سمبه اقدام به بیرون آوردن الکتروود و سرامیک داخل می‌شود. در اولین تلاش برای خارج کردن الکتروود داخلی، عایق سرامیکی کاملاً آسیب می‌بیند. علت اصلی تخریب سرامیک وجود چسب نگه دارنده بسیار قوی مابین سرامیک، الکتروود و پوسته شمع می‌باشد. در گام بعدی نمونه مشابهی از شمع موتور جت دیگری جهت جداسازی قطعات داخلی استفاده می‌شود.

برای این کار شمع داخل کوره قرار داده شده و تا 900°C گرم می‌شود تا چسب سیال شود و گیرایی خود را از دست بدهد و سبب تسهیل خروج قطعات گردد (شکل ۳-۴). سرامیک ناحیه سرد (شکل ۳-۵) با این روش به سادگی خارج می‌شود در حالیکه سرامیک ناحیه گرم و الکتروود از پوسته خارج نمی‌شوند.



شکل ۳-۴- ذوب کردن چسب درون شمع با استفاده از کوره



شکل ۳-۵- سرامیک ناحیه سرد شمع موتور جت J85 و چسب نگهدارنده آن

بنابراین پوسته بیرونی با استفاده از فرز کوچک برش داده می‌شود تا با کمترین آسیب ممکن سرامیک‌های داخل به صورت سالم خارج شود (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- برش پوسته شمع موتور جت J85 با استفاده از فرز

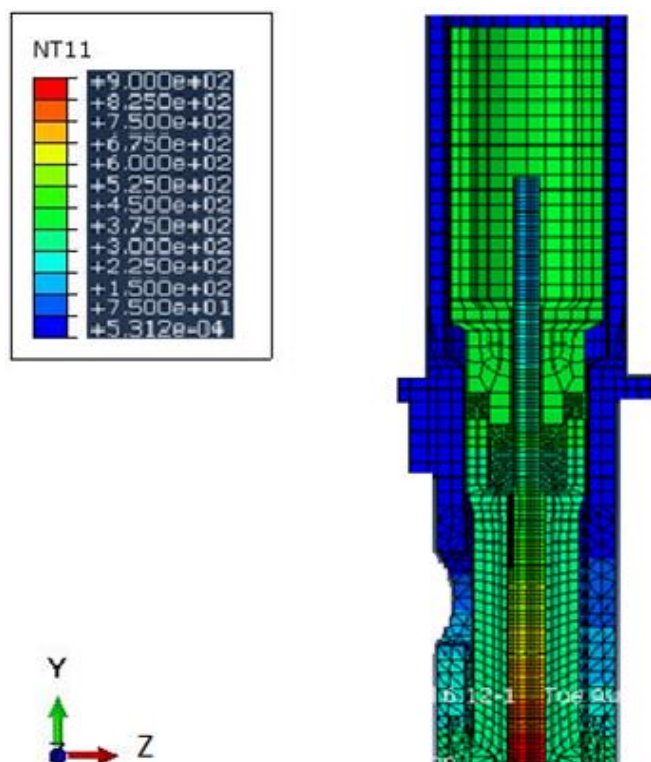
نکته مفید این است که محل دقیق سرامیک‌ها در درون پوسته و سرامیک‌ها نسبت به یکدیگر را مشخص می‌کند (شکل ۳-۷). با انجام این عملیات می‌توانیم فرآیند خروج قطعات از شمع اصلی دیگر را (به دلیل کم بودن قطعات، دسترسی به دو قطعه) به صورت صحیح و مناسب برنامه ریزی کنیم.



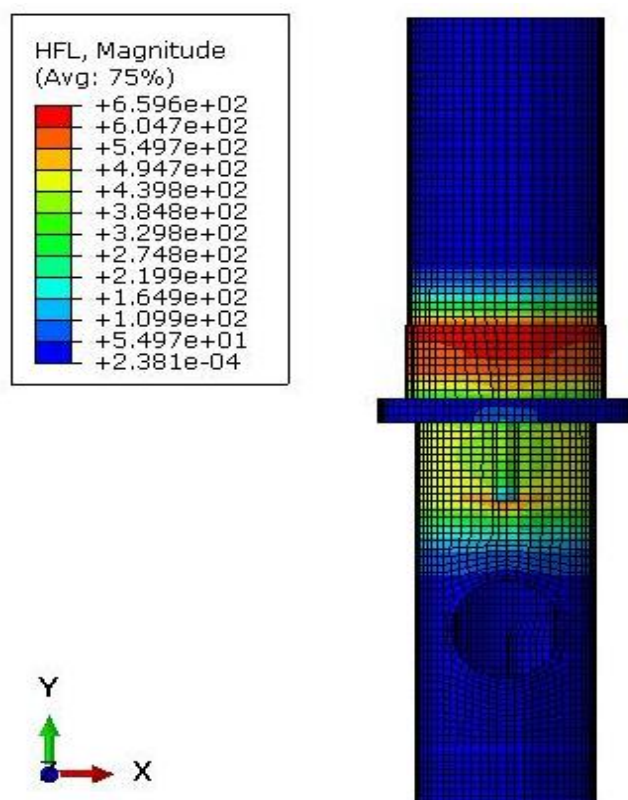
شکل ۳-۷- شمع برش خورده و محل قرارگیری سرامیک‌ها

۳-۳- مدلسازی شمع تحت بار حرارتی

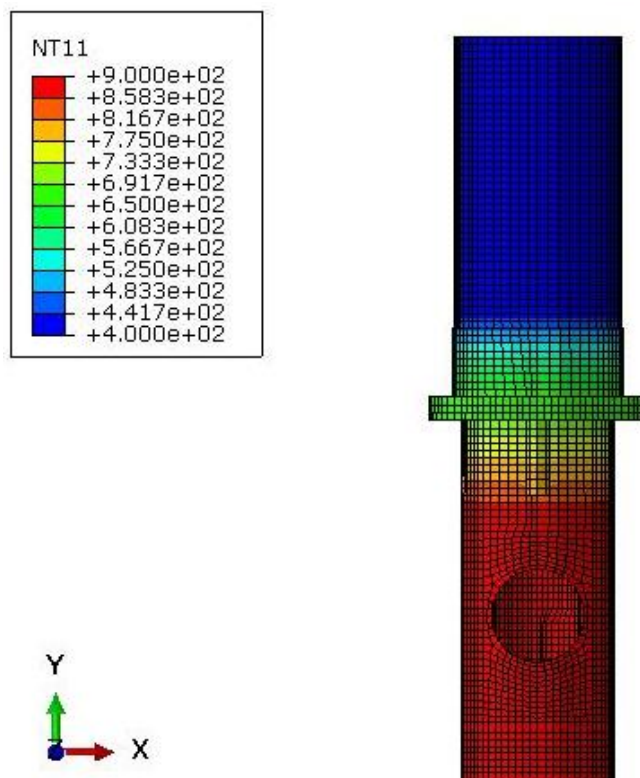
قبل از تهیه نقشه مهندسی قطعه، شمع مورد نظر در نرم افزار آباکوس تحت بار حرارتی قرار گرفته است. تا توزیع حرارت در شمع، تنش‌های حرارتی و مقدار انبساط آن در زمان احتراق مورد بررسی قرار گیرد و در تهیه نقشه این عوامل در نظر گرفته شود. شمع موتور جت از دو ناحیه گرم و سرد تشکیل شده است قسمتی که درون محفظه احتراق قرار دارد گرم و قسمت بیرون آن سرد نامیده می‌شود. شمع در ناحیه گرم دمای 900°C تا 1100°C گرم می‌شود و در قسمت سرد حرارتی نزدیک به 400°C دارد. در این مدلسازی سعی شده ابتدا توزیع حرارت از منطقه گرم به سرد در مجموعه کامل شمع مورد بررسی قرار گیرد و پس از آن تنش‌های حرارتی وارده به مجموعه محاسبه گردد. نتایج بدست آمده از این مدل سازی در شکل های (۳-۸، ۳-۹، ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۲) نمایش داده شده است.



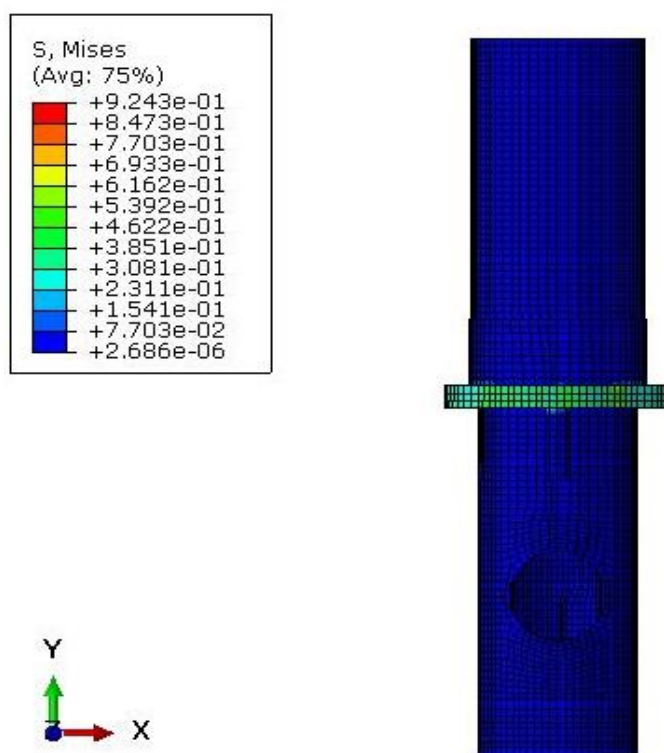
شکل ۳-۸- توزیع دما (°C) در شمع



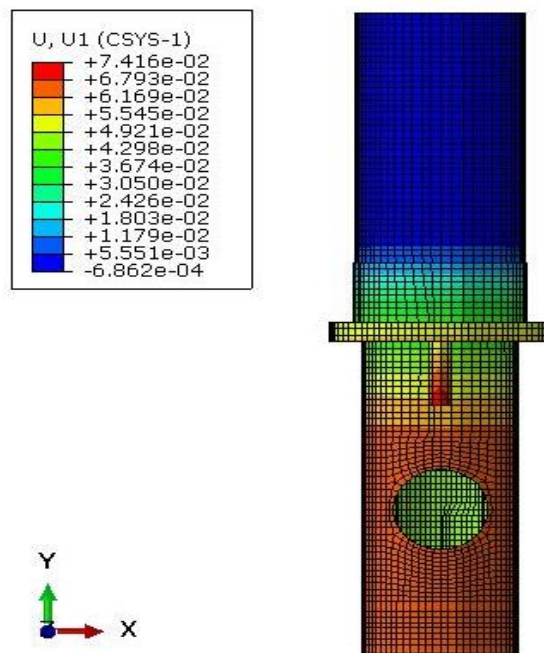
شکل ۳-۹- شار حرارتی (°C) پوسته شمع



شکل ۳-۱۰- تغییرات دما ($^{\circ}\text{C}$) پوسته شمع



شکل ۳-۱۱- تنش فون میزز (MPa)



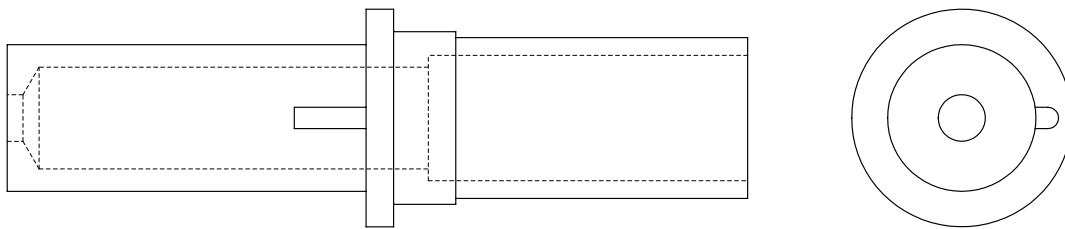
شکل ۳-۱۲- جابجایی شعاعی (mm)

۳-۴- تهیه نقشه پوسته فلزی

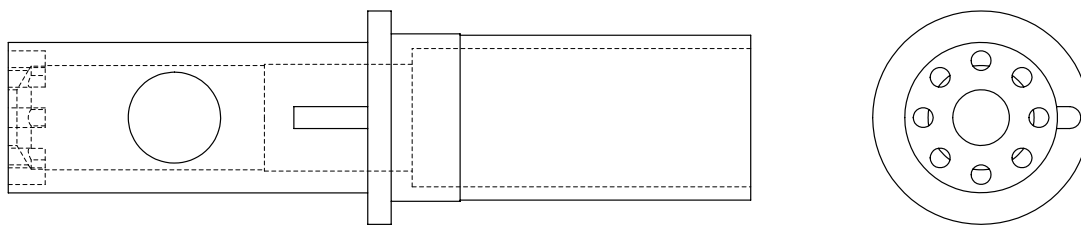
با استفاده از وسایل اندازه گیری دقیق نقشه کامل قطعه تهیه شده و از آنجا که احتمال دارد که داخل پوسته دارای زائیده‌های مختلف و همچنین زوایایی باشد قطعه اصلی را با استفاده از وایرکات به دلیل دقت بالا و کمترین حجم ماشینکاری برش می‌دهیم و پس از آن نقشه دقیق قسمت داخلی پوسته ترسیم می‌شود. علاوه بر آن مشخص می‌شود که پوسته شمع مورد نظر یکپارچه ساخته شده یا از دو متریال متفاوت در ساخت آن استفاده شده است. همچنین بررسی می‌کنیم قسمت‌های داخلی تحت چه عملیات ماشینکاری قرار گرفته اند. اندازه خط برش پوسته توسط ماشین وایرکات در زمان طراحی مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

از آنجایی که زوایا داخلی قطعه کوچک است و با زاویه سنج‌های متداول امکان اندازه گیری دقیق وجود ندارد برای صحت اندازه گیری از موم استفاده شده است. موم را درون پوسته قرار داده تا شکل داخلی پوسته را به خود بگیرد پس از خارج کردن موم زاویه‌ها بررسی می‌شود. با توجه به زوایای اندازه گیری شده در حالت استفاده از موم به تمایز زوایای قطعه و نقشه ابتدای پی می‌بریم. حال نقشه نهایی و اصلاح شده برای فرآیند ساخت ترسیم می‌شود.

باید دقت داشت که از چه فرآیندی برای ساخت استفاده خواهد شد چون نقشه‌ها می‌تواند متفاوت باشد برای مثال در روش ریخته گری دقیق ابتدا نقشه قطعه ریخته‌گری و پس از آن نقشه فرآیند ماشینکاری نهایی تهیه می‌شود (شکل ۳-۱۳). اما اگر بخواهیم قطعه با روش‌های ماشینکاری تولید شود نقشه نهایی قطعه ترسیم می‌شود (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۳- قطعه‌ی ریخته‌گری شده با جرم تقریبی ۸۰ گرم



شکل ۳-۱۴- قطعه‌ی ماشینکاری شده با جرم تقریبی ۶۰ گرم

از آنجایی که قرار است کل شمع ساخته شود بنابراین باید ابعاد قطعات دیگر نیز اندازه گیری و یک نقشه کامل از مونتاژ شمع تهیه شود. قطعه بعد از طراحی کامل جهت بررسی متریال تشکیل دهنده و خواص فیزیکی و مکانیکی آن مورد آنالیز شیمیایی قرار می‌گیرد. استاندارد های استفاده شده برای تهیه نقشه اجرایی در جدول (۳-۱) نشان داده شده است.

جدول ۳-۱- استاندارد تهیه نقشه

ردیف	مشخصه	توضیحات
۱	مشخصات عمومی (بازدید چشمی)	ISO 11565- 3.2
۲	اندازه گیری ابعاد	ISO 8470

۳-۵- آنالیز شیمیایی قطعه

پس از تهیه نقشه و بررسی مجدد ابعاد جهت اطمینان از صحت آن قطعات جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه متالورژی و مواد پارک علم و فناوری خراسان رضوی ارسال می‌شود. پس از انجام آزمایشات بر روی پوسته بیرونی و الکتروود داخلی نتایج اینگونه اعلام شده است. هر دو قطعه از خانواده سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌باشد. پوسته بیرونی از نوع اینکونل ۶۰۰ و الکتروود مرکزی از نوع هستلوی ایکس است.

آنالیز فلزات بر پایه ی آهن، آلومینیوم، مس، نیکل و تعیین جنس آلیاژهای آنها به روش کوانتومتری و XRF در این آزمایشگاه انجام گرفته است (شکل ۳-۱۵). مشخصات دستگاهی که با آن پوسته آنالیز شده در زیر آمده است.

دستگاه آنالیز فلزات-کوانتومتری مدل SOLARIS CCD Plus

-آنالیز فلزات بر پایه ی آهن، آلومینیوم، مس، نیکل و آلیاژهای آنها

-آنالیز قطعات کوچک

-دارای نرم افزار جانبی جهت تجزیه و تحلیل نتایج

-آنالیز فلزات بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی

ASTM E1251, ASTM E415, ASTM E327, ASTM E1999, ASTM E1086, ASTM E403, BS DIN EN 15079,



شکل ۳-۱۵- دستگاه آنالیز فلزات-کوانتومتری مدل SOLARIS CCD Plus

۳-۶- نتایج آنالیز

نتایج آنالیز پوسته و الکتروود مرکزی در جداول (۳-۲، ۳-۳) آمده شده است.

جدول ۳-۲- عناصر تشکیل دهنده پوسته بیرونی از نوع اینکونل ۶۰۰

Element	Spark 1	Spark 2	Mean%
C	0.075	0.081	0.078
Si	0.328	0.336	0.332
Mn	0.495	0.489	0.492
P	0.002	0.002	0.002
S	0.007	0.007	0.007
Cr	15.078	14.746	14.912
Mo	0.000	0.000	0.000
Fe	7.528	7.627	7.578
Al	0.127	0.123	0.125
Cu	0.010	0.014	0.012
Co	0.000	0.000	0.000
B	0.000	0.000	0.000
Nb	0.000	0.000	0.000
Ti	0.336	0.317	0.327
V	0.002	0.002	0.002
W	0.000	0.000	0.000
Pb	0.002	0.002	0.002
Ni	76.010	76.255	76.133

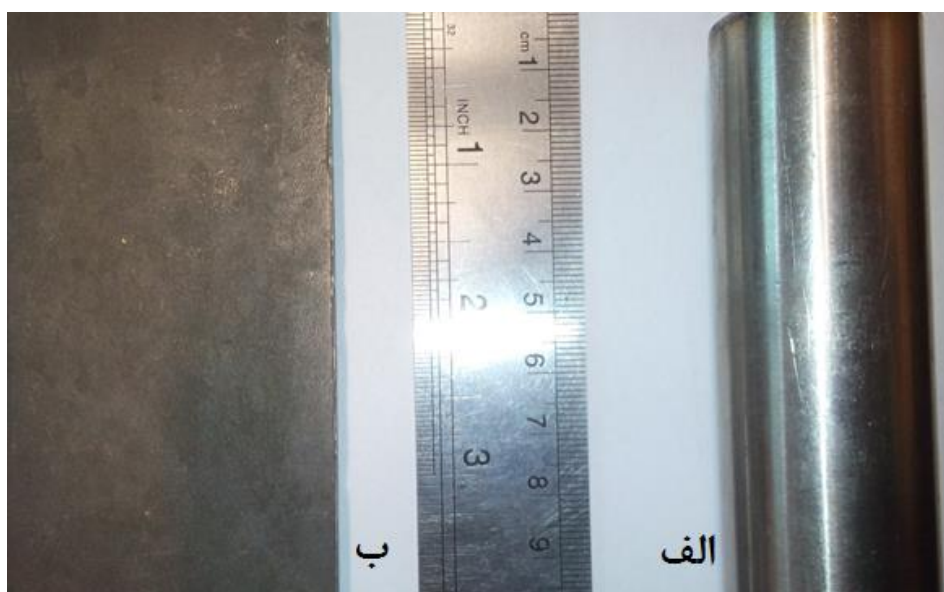
جدول ۳-۳- عناصر تشکیل دهنده الکتروود مرکزی از نوع هستلوی ایکس

Element	Spark 1	Spark 2	Mean%
C	0.054	0.061	0.058
Si	0.493	0.474	0.484
Mn	0.327	0.323	0.325
P	0.012	0.012	0.012
S	0.020	0.015	0.018
Cr	17.548	17.166	17.357
Mo	7.438	7.984	7.711
Fe	17.249	17.049	17.149
Al	0.000	0.000	0.000
Cu	0.182	0.187	0.185
Co	0.836	0.806	0.821
B	0.001	0.003	0.002
Nb	0.008	0.017	0.013
Ti	0.051	0.053	0.052
V	0.024	0.024	0.024
W	0.604	0.619	0.612
Pb	0.004	0.003	0.004
Ni	55.179	55.205	55.177

۷-۳- تهیه ماده خام

پس از مشخص شدن متریکال قطعات شمع نوبت به تهیه مواد خام می‌رسد. با توجه به اندازه و هندسه قطعه و همچنین روش شکل‌دهی پوسته و فرآیندهای مورد استفاده در ساخت آن باید متریکال خام تهیه شود.

اینکونل ۶۰۰ به صورت شفت اکستروود شده با قطر ۳۰ mm و هستلوی به صورت ورق با ضخامت ۵ mm تهیه شده است (شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۷- قطعات خام تهیه شده الف: اینکونل ۶۰۰- ب: هستلوی x

مواد خام نیز تحت آنالیز شیمیایی قرار می‌گیرد تا از نظر صحت مواد و عناصر تشکیل دهنده آن با قطعات اصلی بررسی شود. آنالیز در آزمایشگاه متالورژی و مواد پارک علم و فن آوری خراسان رضوی دقیقاً در شرایط آنالیز قطعات اصلی صورت گرفته است. عناصر تشکیل دهنده مواد خام در جداول (۳-۴، ۳-۵) گزارش شده است.

جدول ۳-۴- آنالیز عناصر تشکیل دهنده شفت اینکونل ۶۰۰

Element	Spark 1	Spark 2	Mean%
C	0.021	0.005	0.013
Si	0.0323	0.300	0.312
Mn	0.246	0.249	0.248
P	0.002	0.001	0.002
S	0.011	0.009	0.010
Cr	12.503	12.754	12.629
Mo	0.000	0.000	0.000
Fe	13.306	10.259	10.283
Al	0.169	0.155	0.162
Cu	0.000	0.000	0.000
Cu	0.012	0.006	0.009
Co	0.055	0.050	0.053
B	0.000	0.000	0.000
Nb	0.000	0.000	0.000
Ti	0.361	0.346	0.354
V	0.012	0.012	0.012
W	0.000	0.000	0.000
Pb	0.002	0.002	0.002
Ni	75.976	75.851	75.914

جدول ۳-۵- آنالیز عناصر تشکیل دهنده ورق هستلوی X

Element	Spark 1	Spark 2	Mean%
C	0.049	0.081	0.065
Si	1.133	1.148	1.141
Mn	0.470	0.393	0.432
P	0.012	0.015	0.014
S	0.012	0.013	0.013
Cr	19.282	17.166	18.224
Mo	5.221	5.103	5.162
Fe	19.189	20.438	19.814
Al	0.071	0.066	0.069
Cu	0.138	0.141	0.140
Co	1.798	1.530	1.664
B	0.005	0.003	0.004
Nb	0.071	0.058	0.065
Ti	0.009	0.009	0.009
V	0.033	0.030	0.032
W	0.558	0.520	0.539
Pb	0.003	0.004	0.004
Ni	51.662	52.938	52.300

۳-۸- ساخت پوسته فلزی

برای این امر با توجه به شکل و ابعاد قطعه یک استراتژی مناسب جهت فرآیند ماشینکاری انتخاب می‌شود. اکثر قسمت‌های قطعه را می‌توان با ماشین تراش CNC ماشینکاری کرد اما خار^{۲۲} کوچک (شکل ۳-۱۷) که بر روی پوسته قرار دارد که ماشینکاری آن با روش‌های معمول امکان پذیر نیست به همین جهت قسمتی از قطعه ماشینکاری نمی‌شود تا با استفاده از اسپارک فرم اصلی خار بر روی قطعه به صورت یکپارچه ایجاد شود.



شکل ۳-۱۸- خار روی پوسته

کنترل دقیق سطح ماشینکاری شده برای رسیدن به قطعاتی با قابلیت اطمینان و طول عمر بالا، در قطعات هوافضا حیاتی است. در ساخت شمع موتور جت باید دقت کرد که دقت ابعادی و کیفیت سطح اهمیت زیادی دارد و در عملیات ماشینکاری به این نکته باید توجه کرد.

از عوامل مهم در بدست آوردن سطوح با کیفیت بالا در تراشکاری، تنظیم متغیرهای تراشکاری می‌باشد که نامتناسب بودن هر یک از آنها موجب عدم دقت و کیفیت در سطوح می‌گردد و تناسب آنها بر اساس ابزار انتخابی می‌باشد. متغیرهای تراشکاری عبارت از سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش می‌باشند.

پارامترهای ماشینکاری که انتخاب شده اند بر اساس اطلاعات در دسترس در مقالات و آزمایش‌های گذشته بوده است. سرعت برش در حرارت تولیدی در ماشینکاری تاثیر دارد. به موجب تغییر فرم ماشینکاری تنش‌های باقیمانده روی سطح ماشینکاری شده وارد می‌شود. علاوه بر این نرخ پیشروی عمق

²² key

برش روی نیروی برش تاثیر می‌گذارد که در تراش، روی کارسختی و تنش‌های باقیمانده در سطح ماشینکاری شده اثر می‌گذارد [۲۹].

آگاهی از نیروهای برش یکی از موضوعات پر اهمیت در فرآیندهای ماشینکاری است. آگاهی از نیروها به منظور تخمین قدرت مورد نیاز ماشین ابزار و طراحی اجزا آن، صلبیت مناسب و بدون ارتعاش ماشین ابزار امری ضروری است.

عوامل موثر بر نیروی ماشینکاری عبارتند از:

- ماده : تابع نوع، وضعیت شبکه و وضعیت عملیات حرارتی می‌باشد.
- ابزار : تابع جنس، هندسه، وضعیت ساییدگی و شکل می‌باشد.
- کمیت‌های تنظیمی : تابع پیشروی، عمق تراش و سرعت تراش می‌باشد.

سایر عوامل : تابع روانکاری، خنک سازی، شکل براده و مقاومت سایشی می‌باشد [۳۰].

کیفیت سطح یکی از مهم ترین پارامترهای کارکردی قطعات مکانیکی و همچنین یکی از محدودیت‌ها در انتخاب پارامترهای براده برداری در طراحی فرآیند می‌باشد کیفیت سطح در بارگذاری خستگی، انطباق‌های دقیق، نرخ سایش و مقاومت خوردگی تاثیرگذار می‌باشد [۳۱]. سطوح با روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که از حرکت نسبی ابزار و قطعه کار نسبت به هم حاصل می‌شود. یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر کیفیت سطح ماده، ابزار برشی می‌باشد. ابزار با موادسخت تر سطح بهتری را حاصل می‌کند. عامل موثر دیگر بر کیفیت سطح صلبیت ماشین ابزار، قطعه کار و ابزار برشی است. ارتعاش در سیستم ماشینکاری باعث کاهش طول عمر ابزار و کاهش کیفیت سطح می‌شود. از دیگر عوامل موثر بر کیفیت سطح می‌توان به ویژگی هندسه ابزار و پارامترهای ماشینکاری که شامل سرعت برش، عمق براده برداری و نرخ پیشروی می‌باشد، اشاره کرد.

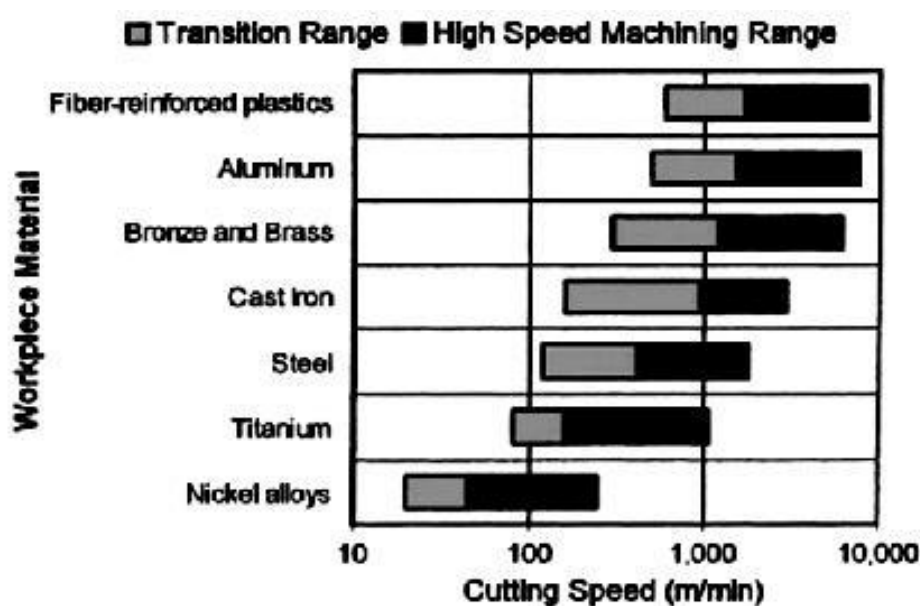
فرآیند ماشینکاری دارای سه جنبه اصلی وضعیت و جنس قطعه کار، شرایط و عوامل ماشینکاری و انتخاب نوع ابزار است. که انتخاب صحیح ابزار از اهمیت بیشتری برخوردار است. به دلیل تنوع ابزار، شرایط تریبو سیستم و... انتخاب صحیح ابزار پیچیدگی خاص خود را دارد، هم چنین می‌توان گفت که

انتخاب صحیح ابزار به نوع عملیات ماشینکاری پرداخت کاری یا خشن کاری، جنس قطعه کار و حالت آن، شکل و شرایط سطح قطعه، استحکام ماشین ابزار و قدرت آن بستگی دارد.

ابزارهای سرامیکی و CBN 3 ابزارهای برشی پیشرفته ای هستند که حاصل نیاز گسترده به بالا رفتن بهره‌وری در ماشینکاری سوپرآلیاژها و آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت می‌باشند نشان داده شده است که ابزارهای سرامیکی توانایی براده برداری در سرعتهای برشی تا 750 m/min در ماشینکاری اینکونل را دارا هستند.

ابزارهای کاربیدی روکشدار تا حد زیادی برای ماشینکاری آلیاژهای پایه نیکل، بخصوص اینکونل بکار می‌رود.

ابزارهای برشی از جنس کاربید تنگستن به صورت گسترده برای براده‌برداری از سوپرآلیاژها در سرعت‌های برشی کمتر از 30 m/min مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل (۳-۱۸) محدوده ماشینکاری پر سرعت برای مواد مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۹- محدوده ماشینکاری پر سرعت برای مواد مختلف

تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر نیروهای ماشینکاری

با افزایش سرعت برش، نیروی برشی و در نتیجه انرژی مخصوص تراش کاهش می‌یابد. افزایش سرعت برش مساحت صفحه برش و یا بهتر بگوییم حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش یافته لذا انرژی

مخصوص کمتری صرف برداشتن براده می‌گردد. همچنین با افزایش سرعت برشی نیروی اصطکاک روی سطح قلم نیز کاهش یافته و باعث کاهش نیروی ماشینکاری می‌گردد. افزایش سرعت پیشروی و عمق برش باعث افزایش نیروهای ماشینکاری می‌شود. افزایش نیرو با افزایش عمق براده برداری و نرخ پیشروی را می‌توان حاصل از افزایش سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته ($A_c = a_p \times a_f$) دانست که با افزایش عمق براده برداری و نرخ پیشروی سطح مقطع مقاوم در برابر برش افزایش یافته و در نتیجه نیروی بیشتری برای جدا کردن براده از سطح قطعه کار لازم است.

روند تاثیرگذاری پارامترهای ماشینکاری بر زبری سطح

رابطه تئوریک موجود برای پیش بینی زبری سطح حاصل ابزار با نوک گرد، رابطه (۱) می‌باشد که زبری را تابعی از شعاع نوک قلم و نرخ پیشروی معرفی می‌کند. با توجه به رابطه، افزایش شعاع نوک قلم باعث کاهش ارتفاع ناهمواری سطح ماشینکاری و افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش ارتفاع ناهمواری سطح ماشینکاری شده خواهد شد. همان گونه که در رابطه مشاهده می‌شود تاثیر سایر پارامترهای ماشینکاری مانند سرعت برش و عمق براده برداری و سایر پارامترها در این رابطه در نظر گرفته نشده است.

$$R_a = 0.0321 \times \frac{f^2}{r} \quad (1)$$

در مورد تاثیرگذاری سرعت برش ابتدا در اثر ازدیاد سرعت برش سطح کار پرداخت تری حاصل می‌شود سپس به دلیل لبه انباشته، ناهمواری سطح بیشتر می‌شود. با از بین رفتن لبه انباشته، مجدداً با ازدیاد سرعت برش سطح کار پرداخت می‌شود. دلیل کاهش ناهمواری سطح در اثر ازدیاد سرعت برشی را می‌توان چنین توجیه نمود که با افزایش سرعت برش تغییر شکل پلاستیکی آسانتر شده و اصطکاک بین سطوح آزاد و سطوح ماشینکاری شده و همچنین اصطکاک سطح قلم و براده در اثر افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد. در سرعت‌های زیاد عملاً افزایش سرعت برشی تاثیر چندانی در ارتفاع ناهمواری سطوح ندارد، زیرا در این حالت ارتفاع واقعی به ارتفاع تئوری نزدیک می‌شود [۳۲].

با توجه به پارامترهای موثر گفته شده برای رسیدن به کیفیت سطح مناسب سرعت برشی ۵۰ m/min و نرخ پیشروی متوسط ۰.۰۸ rad/min و عمق برشی ۰.۳ mm تا ۰.۵ mm در نظر گرفته شده است و

از ابزار کاربیدی تنگستن با روکش TiAlN به دلیل کیفیت سطح قابل قبول برای ماشینکاری پوسته شمع استفاده شده.

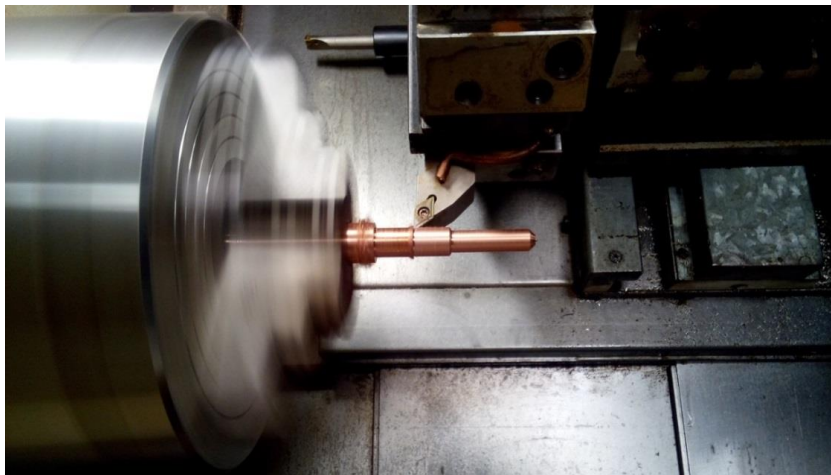
۳-۹- مراحل ساخت قطعه

به دلیل قیمت بالای اینکونل و دردسترس نبودن آن سعی شده ابتدا نمونه ای را بر روی فلز مشابه ایجاد شود. برای این کار از فولاد سخت VCN150 استفاده شده است. این امر سبب می شود که در صورت اشتباه در مراحل ساخت فرصت جبران باشد از طرفی با اندازه گیری نهایی میتوان دریافت در کدام مرحله نیاز به اصلاح وجود دارد و کلیه معایب قطعه گرفته می شود. پس از اتمام ساخت نمونه مشابه فرآیند ساخت قطعه اصلی آغاز می شود.

ابتدای شفت اینکونل با استفاده از ماشین تراش CNC کف تراشی شده پس با استفاده از تاستر لبه یاب نقطه صفر قطعه کار مشخص شده و برنامه ماشینکاری استارت می شود. در این برنامه ابتدا قطعه رو تراشی شده تا به قطر ۲۳ mm برسد حال وارد مرحله ماشینکاری با دقت بالاتر می شویم و پله های روی پوسته شمع تراشکاری می شود. برنامه به گونه ای نوشته شده تا ۰.۵ mm مانده به قطر نهایی قطعه به صورت پرداخت ماشینکاری شود تا سطح نهایی کیفیت مورد نظر را داشته باشد.

پس از تراش قسمت بیرونی پوسته نوبت به ماشینکاری قسمت داخلی می رسد. ابزار و سیکل سوراخکاری را از برنامه فراخوان نموده و عملیات سوراخکاری انجام می گیرد. باید توجه داشت که زاویه ای که با مته ایجاد می شود 118° می باشد اما زاویه مورد نظر ما 90° است. پس نیاز داریم برای این امر از ابزار دیگری استفاده شود با توجه به امکانات سه راه وجود دارد، ۱. ماشینکاری با ابزار داخل تراش که با توجه به ابعاد داخل کار سختی است. ۲. استفاده از ماشین اسپارک که نمونه الکتروود آن ساخته شد (شکل ۳-۱۹) اما برای موقعیت دهی مکان مناسب الکتروود و میزان ماشینکاری کار سختی است از طرفی با توجه به تست انجام شده نیاز به ساخت چند الکتروود می باشد چون طول ماشینکاری زیاد است الکتروود در حین ماشینکاری خورده می شود در نتیجه ابعاد نهایی پوسته شمع دقت لازم را ندارد. ۳. استفاده از مته با زاویه راس 90° ، روش سوم به دلیل راحتی و دقت بیشتر مورد استفاده قرار

می‌گیرد ابتدا با مته اصلی سوراخکاری انجام شده و فقط قسمت نشیمنگاه سرامیک‌ها درون پوسته که دارای زاویه 90° می‌باشد از این مته استفاده شده است



شکل ۳-۱۹- الکتروود مسی جهت ماشینکاری قسمت داخلی قطعه

پس از اتمام مرحله ماشینکاری داخلی نوبت به ماشینکاری انتهای شمع و جدا کردن قطعه از بقیه شفت است. با استفاده از ابزار برش قسمت ماشینکاری از ماده خام جدا شده و بعد با ابزار فرم فیلر روی پوسته ایجاد شده است.

برای ایجاد سوراخ‌های جلوی شمع و سوراخ ورودی چسب مخصوص به دلیل قطر کم و تخت بودن انتهای سوراخ‌ها از دستگاه سوپر دریل استفاده شده است (شکل ۳-۲۰). برای ایجاد این سوراخ‌ها میتوان از ابزار انگشتی با دستگاه فرز استفاده کرد اما قطر کم سوراخ‌ها و سختی بالای اینکونل و تنش‌های وارده به ابزار در حین ماشینکاری استفاده از این فرآیند را سخت می‌کند.



شکل ۳-۲۰- سوراخکاری قطعه با دستگاه سوپر دریل

سوپر دریل‌ها عملکردی مشابه اسپارک دارند و برای ایجاد سوراخ‌های دقیق با قطر کم و فواصل مشخص کاربرد دارند. در این روش قطعات با سختی بالا که ماشینکاری آن با روش‌های دیگر مشکل است می‌توان سوراخکاری کرد و برای سوراخکاری لبه‌های پیشرو انتهای پره‌های توربین و سوراخ‌های درون موتور جت جهت ایجاد جریان گاز و بروی مواد همچون کوار، هستلوی، تیتانیوم و اینکونل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با استفاده از ماشین فرز و ابراز انگشتی سوراخ بزرگ روی پوسته که در هنگام ورود هوا و سوخت به داخل محفظه احتراق وظیفه عبور مقداری از هوا و سوخت از داخل ناحیه گرم شمع جهت خنک‌سازی و تمیز کردن سطح شمع برای جرقه بهتر را دارد ماشینکاری شده است.

پس از اتمام ماشینکاری سوراخ‌ها نوبت به قسمت نهایی قطعه یعنی خار روی پوسته است که بهترین راه جهت ایجاد آن با استفاده از دستگاه اسپارک می‌باشد. با توجه به هندسه الکتروود مورد نظر و نیاز به دقت بالا و کیفیت سطح مناسب از دستگاه وایرکات جهت ساخت الکتروود استفاده شده است (شکل ۳-۲۱). ماشینکاری تخلیه الکتریکی بوسیله ابزار سیمی (DEWC) که عموماً به‌عنوان ماشینکاری وایرکات (WEDM) شناخته می‌شود فرآیندی است که به‌منظور تولید شکل‌های پیچیده ۲ و ۳ بعدی در مواد رسانای جریان الکتریسته بکار می‌رود.



شکل ۳-۲۱- الکتروود مسی جهت ماشینکاری خار روی پوسته

پس از ساخت الکتروود قطعه را روی گیره ماشین اسپارک بسته دقت می‌شود قطعه کاملاً ساعت شده باشد تا در هنگام ماشینکاری مشکلی برای فرم و دقت ابعادی قطعه ایجاد نشود.

حال نوبت ماشینکاری قسمت نهایی قطعه با دستگاه اسپارک می‌باشد. باید دقت کرد که در حین ماشینکاری الکتروود سطوح دیگر قطعه را ماشینکاری نکند از طرفی روی سطح الکتروود که با رینگ روی پوسته برخورد خواهد داشت با رنگ پوشش داده شده تا از ماشینکاری این قسمت پوسته جلوگیری شود.

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند پیشرفته ماشینکاری ترموالکتریکی است که در آن بر اثر جرقه‌های تولید شده تخلیه الکتریکی بین قطعه کار و ابزار عمل براده برداری صورت می‌گیرد. در این روش قطعه کار و ابزار در سیال دی الکتریک غوطه‌ور بوده و تخلیه الکتریکی باعث ذوب و تبخیر قسمتی کوچک از قطعه کار شده که بوسیله سیال دی الکتریک از محدوده ماشینکاری دور می‌شود. دقت ابعادی و صافی سطح در قطعات تولیدی با این روش معولا از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین، نرخ براده برداری و صافی سطح قطعه کار از جمله مهمترین مشخصه‌های خروجی در این روش است. این خروجی‌ها خود تحت تاثیر مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند، از جمله ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور روی کار، قرار دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که زمان روشنی پالس، زمان یا فاکتور روی کار، ولتاژ مدار باز و شدت جریان تخلیه موثرترین پارامترهای ماشینکاری در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی می‌باشند [۳۳].

در این مرحله از ساخت پوسته از ماشین اسپارک بهروز A ۶۰ (شکل ۳-۲۲) استفاده شده استفاده شده. آمپر دستگاه بر روی A ۸، زمان روشن بودن برای شستشوی بهتر بر روی S ۹ و زمان خاموش بودن پالس هم روی S ۴ انتخاب شده است.



شکل ۳-۲۲- ماشین اسپارک بهروز



شکل ۳-۲۳- پوسته فلزی شمع ساخته شده

همانطور که (شکل ۳-۲۳) مشاهده می‌شود محل ماشینکاری با ماشین اسپارک دارای کیفیت سطح پایین تر نسبت به سطوح ماشینکاری شده می‌باشد که می‌تواند در عملکرد شمع موتور هوایی تاثیرگذار باشد. پس از اتمام مراحل ساخت پوسته نوبت به ساخت الکتروود مرکزی از ورق هستلوی می‌رسد.

ورق هستلوی را به ابعاد 5×5 mm با استفاده از وایرکات به شکل مفتول با قطر ۵ mm شکل داده شده سپس با دستگاه تراش فرم نهایی الکتروود ایجاد می‌شود (شکل ۳-۲۴). باید دقت کنیم قطر الکتروود کم می‌باشد و احتمال قلاب کردن در حین ماشینکاری می‌باشد برای جلوگیری از این امر سرعت پیشروی و عمق براده برداری کم در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۲۴- الکتروود ساخته شده

فصل ۴ نتایج و بحث

با توجه به اینکه در این پروژه ساخت پوسته بیرونی شمع موتور جت مدنظر می‌باشد و دیگر قطعات در پروژه دیگر تعریف شده است لذا در این مرحله فقط می‌توان الزامات عملکردی قطعه را مورد بررسی قرار داد.

۴-۱- الزامات فیزیکی

ابعاد و اندازه‌ها: ابعاد کلی، ابعاد مهم در نصب قطعه و اتصال کانکشن‌ها باید مطابق نقشه‌ها باشد. وزن: با حفظ الزامات عملکردی، وزن قطعه باید هرچه ممکن است کمتر باشد و از مقدار داده شده در نقشه بیشتر نباشد.

با اندازه گیری دقیق قطعه مشخص می‌شود قطعه ساخته شده از نظر ابعاد و اندازه در محدوده تلورانس مجاز می‌باشد. اما در محل فلانچ روی پوسته دارای عیوبی در اثر فرآیند ماشینکاری می‌باشد که با عملیات سنگ زنی می‌توان این عیب را برطرف کرد.

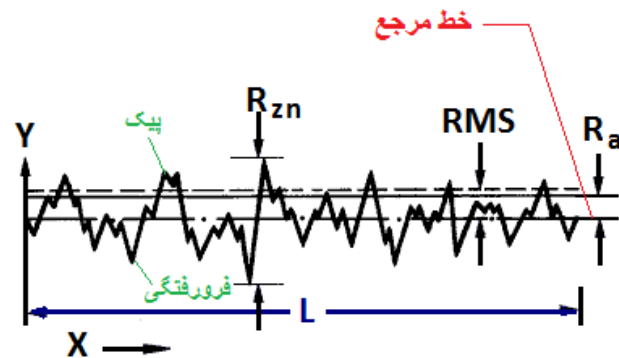
۴-۲- کیفیت سطح

زبری سنجی

زبری خاصیتی از بافت سطحی ماده است، که با توپوگرافی ناهموار آن در مقایسه با یک سطح صاف ایده آل شناسایی می‌شود. یک سطح زیر حاوی ناهمواری، برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که به فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته اند.

۴-۲-۱ تکنیک‌های اندازه گیری زبری سطح

پروفایل یا زبری سطح، Ra ، یک روش محاسبه کمی زبری نسبی است. Ra با اندازه گیری خطی زبری در کل سطح تعیین می‌شود (شکل ۴-۱). این پارامتر با زبری مساحت سطحی، Sa رابطه نزدیکی دارد؛ به این ترتیب که میانگین چندین پروفایل سطحی محاسبه شده و گزارش می‌شود. به عبارت دیگر، Sa میانگین Ra سطح است. روش‌های متعددی برای اندازه گیری زبری سطحی وجود دارد که به دو دسته تکنیک‌های تماسی و غیر تماسی تقسیم می‌شوند. در روش تماسی، که اساس کار دستگاه پروفیلومتر است، زبری سطح با حرکت دادن نوک حسگر در طول سطح اندازه گیری می‌شود. میکروسکوپ الکترونی نمونه متداولی از دستگاه‌های اندازه گیری زبری به روش غیر تماسی است.



شکل ۴-۱- اندازه گیری زبری سطح

بعد از اندازه گیری مقادیر زبری سطحی، مقدار نسبی با استفاده از انواع واحدهای استاندارد صنعتی گزارش می‌شود. پروفایل سطحی، R_a معمولاً به صورت میانگین ارتفاع پیک‌ها و فرورفتگی‌ها نسبت به خط مرجع محاسبه می‌گردد. میانگین خط مرکزی (CLA) همان R_a بر حسب میکرواینچ است. مقدار R_a طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(x)| dx$$

جذر میانگین مربع (RMS) نیز نوع دیگری از محاسبه زبری سطحی است که به کمک رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$RMS = \left(\frac{1}{L} \int_0^L Y(x)^2 dx \right)^{1/2}$$

با توجه به روابط ارائه شده می‌توان گفت که مقدار RMS هر سطح حدود ۱۱٪ از مقدار R_a آن بیشتر است.

زبری میانگین ده نقطه ای، R_z ، پارامتر جایگزین دیگری برای پروفایل سطحی است که در آن فاصله عمودی میان پنج عدد از بلندترین پیک‌ها و پنج عدد از عمیق ترین فرورفتگی‌ها اندازه گیری شده و میانگین آنها با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5})$$

جدول ۴-۱- صافی سطح

بافت سطحی	ارتفاع زبری (μm)	قابلیت دید	برخی از عوامل احتمالی
زبر	۱۶۰-۴۵	قابل دیدن با چشم و احساس با لمس کردن	نورد، ریخته گری در قالب فلزی، برش قاب،
صاف	۴۰-۱۰	قابل دیدن با چشم اما غیر قابل احساس با لمس کردن	تراشکاری دقیق، فرزکاری، اره کاری، ریخته گری ماسه ای، نورد داغ، فورج، صفحه تراشی،
بسیار صاف	۱۰-۲.۵	غیر قابل دیدن با چشم	فورج، سوراخکاری، فرزکاری، فرزکاری شیمیایی، صفحه تراشی، لیزر، پانچ کاری، تراشکاری، برقکاری،
فراصاف	۱-۰.۴	غیر قابل دیدن با چشم	سنگ زنی الکترولیتی، اکستروژن، نورد سرد، دای فورج، دای کاست ثقلی، سنباده زنی، پانچ کاری، تراشکاری، الکتروپولیش،

با توجه به جدول (۴-۱) می‌توان دریافت قسمت‌های تراشکاری شده قطعه دارای سطحی صاف و ناحیه ماشینکاری با اسپارک دارای سطحی زبر می‌باشد. پوسته شمع اصلی با روش ریخته گری دقیق تولید شده است و برخی از سطوح آن ماشینکاری شده با مقایسه دو قطعه می‌توان دریافت سطوحی که توسط عملیات تراش ایجاد شده دارای صافی سطح قابل قبول می‌باشد. اما قسمتی که با روش تخلیه الکتریکی ماشینکاری شده است دارای سطح زبر و قابل قبول نمی‌باشد. برای بهبود سطح مورد نظر باید پارامترهای ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی را تغییر داد تا بتوان به کیفیت سطح مناسب دست یافت. برای داشتن سطح دقیق و پرداخت بایستی از جرقه‌هایی با زمان روشن کم و انرژی پایین استفاده شود. به منظور عملیات پرداخت تصفیه دقیق دی الکتریک ضروری است. الکتروود از آلیاژ مس و تنگستن قابلیت پرداخت کاری خوبی نسبت به الکتروود مس دارد.

۳-۴- آزمایش‌های چگالی و سختی سنجی

با توجه به اینکه قطعه اصلی از روش ریخته‌گری دقیق و قطعه ساخته شده در این تحقیق به وسیله ماشینکاری ساخته شده است قطعات را مورد آزمایش چگالی و سختی سنجی قرار می‌دهیم (شکل ۴-۲) سپس نتایج را بررسی می‌کنیم.

۳-۴-۱ آزمایش چگالی پوسته شمع اصلی

قسمتی از پوسته فلزی شمع مورد آزمایش چگالی قرار گرفته و نتایج در جدول (۴-۲) نشان داده شده است.



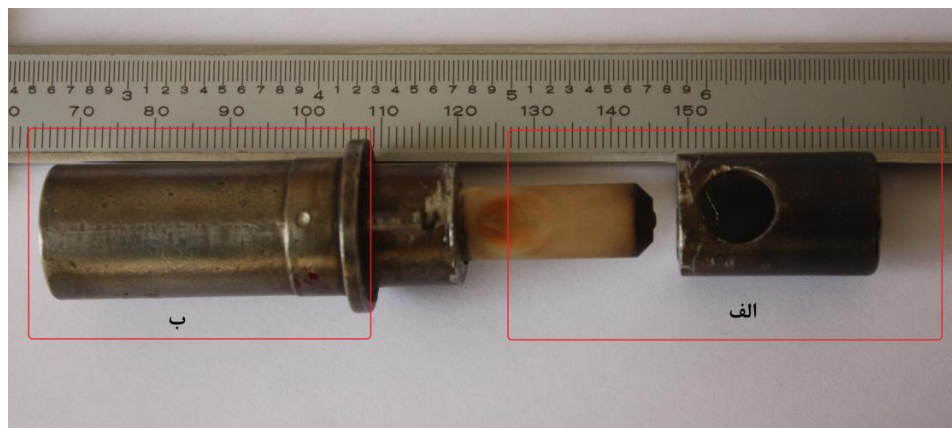
شکل ۴-۲: الف- وزن پوسته در آب - ب: وزن پوسته بیرون آب

جدول ۴-۲- نتایج چگالی پوسته

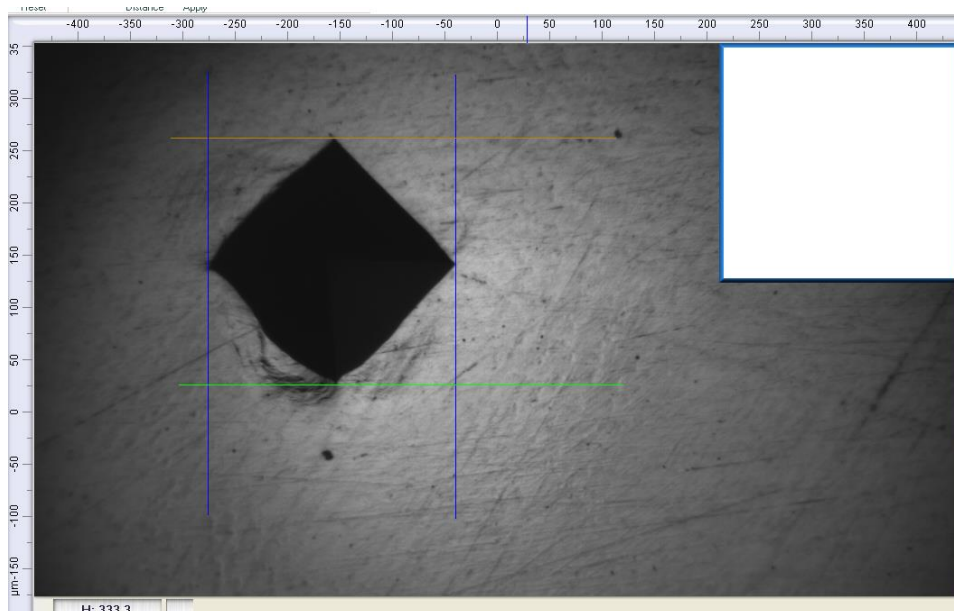
قطعه	وزن درون آب (g)	وزن بیرون آب (g)	چگال (g/cm^3)
پوسته	۲۳۰۲	۱۸۹۸۵	۸.۲۴۷

۴-۳-۲ آزمایش سختی سنجی پوسته شمع اصلی

پوسته شمع به دو قسمت ناحیه گرم و سرد برش داده شده و هر قسمت جداگانه سختی سنجی شده است (شکل ۴-۳). قسمتی از پوسته درون محفظه احتراق قرار میگیرد ناحیه گرم و قسمت بیرون محفظه احتراق ناحیه سرد نامیده می شود. تست صورت گرفته بر روی ناحیه گرم و سرد پوسته در شکل های (۴-۴، ۵-۴) مشاهده می شود و نتایج آن در جداول (۴-۴، ۳-۴) آمده است.



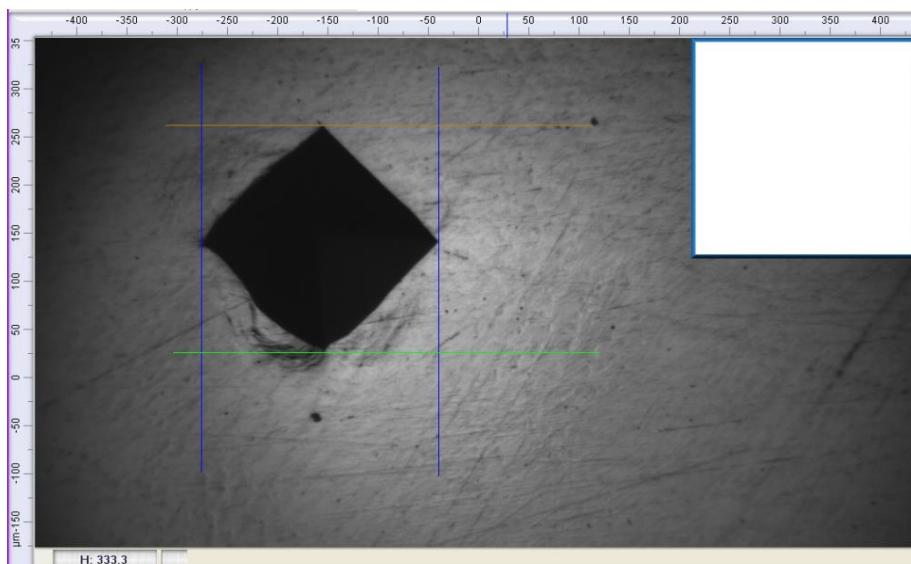
شکل ۴-۳- الف : ناحیه گرم - ب: ناحیه سرد



شکل ۴-۴- تست ویکرز ناحیه گرم پوسته

جدول ۴-۳- نتایج تست ویکرز بر روی ناحیه گرم پوخته

NO	Hardness	Method	Lens /zoom
1	296	HV10	20X(1)239.5X
2	334	HV10	20X(1)239.5X
3	207	HV10	20X(1)239.5X
4	212	HV10	20X(1)239.5X



شکل ۴-۵- تست ویکرز ناحیه سرد پوخته

جدول ۴-۴- نتایج تست ویکرز بر روی ناحیه سرد پوست

NO	Hardness	Method	Lens /zoom
1	333	HV10	20X(1)239.5X
2	328	HV10	20X(1)239.5X
3	335	HV10	20X(1)239.5X
4	340	HV10	20X(1)239.5X

نتایج بدست آمده از سختی سنجی دو ناحیه گرم و سرد پوسته شمع نشان می‌دهد قسمت‌های مختلف ناحیه سرد دارای سختی یکسان می‌باشند اما در ناحیه گرم پوسته سختی‌ها متفاوت هستند. این امر به محیط کارکرد دو قطعه ربط دارد قسمت گرم درون محفظه احتراق در درجه حرارت بالا 900°C تا 1100°C قرار دارد. همچنین شوک حرارتی در این محل زیاده‌تر از ناحیه سرد است. مخلوط سوخت و هوا نیز در زمان ورود به محفظه احتراق با پوسته شمع برخورد دارد و مقداری جهت خنک‌کاری و کمک به ایجاد جرقه بهتر توسط لایه نیمه‌هادی روی سرامیک، الکتروود مرکزی و پوسته بیرونی از سوراخ بزرگ روی بدنه وارد قسمت داخلی پوسته می‌شود و از سرپوسته شمع خارج می‌شود. این فرآیند نیز از عوامل تاثیرگذار بر روی سختی پوسته در ناحیه گرم پوسته می‌باشد.

۴-۳-۳ چگالی و سختی شفت اینکونل ۶۰۰

چگالی شفت اینکونل ۶۰۰ بر اساس اطلاعات شرکت تولید کننده 8.4 g/cm^3 می‌باشد. سختی شفت تهیه شده با توجه به جدول (۴-۵) و روش تولید که با کشش سرد صورت گرفته 30 HRC می‌باشد. با استفاده از جدول تبدیل، سختی راکول به ویکرز تبدیل شده است نتیجه بدست آمده 310 HV می‌باشد.

جدول ۴-۵ - میزان سختی شفت اینکونل با توجه به اطلاعات سازنده

Form and Condition	Tensile Strength		0.2% Yield Strength		% Elongation in 2"	% Reduction of Area	Rockwell Hardness
Rod and Bar							
Cold-drawn							
Annealed	80-100	552-689	25-50	172-345	55-35	70-60	65-85B
As-drawn	105-150	724-1034	80-125	552-862	30-10	60-30	30C min

با توجه به سختی و چگالی بدست آمده از پوسته شمع اصلی همچنین سختی و چگالی ارائه شده از شرکت تولیدکننده شفت اینکونل ۶۰۰ که پوسته شمع ساخته شده در این تحقیق با آن می‌باشد می‌توان دریافت سختی و چگالی هر دو قطعه در یک محدوده می‌باشند.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه به ساخت پوسته شمع موتور هوایی J79-17 به روش ماشینکاری پرداخته شد. ابتدا قطعات شمع جهت مهندسی معکوس پوسته و تهیه نقشه اجرایی دmontazh گردید. با توجه به روش‌های تست شده برای این امر بهترین روش بعد از اندازه گیری اولیه برش پوسته بدلیل مشخص شدن زوایای داخلی پوسته و فرآیندهای انجام گرفته جهت ساخت آن می‌باشد. سپس قطعه آنالیز شیمیایی گردید و مشخص می‌شود پوسته از اینکونل ۶۰۰ جزء خانواده سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط کارکرد قطعه در موتور با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی حرارتی شمع و پوسته انجام شده است. توزیع حرارت در کل شمع، فلاکس حرارتی، تغییرات دما در پوسته و تنش‌های وارده به آن مانند تنش فون میزز و تغییرات شعاعی در اثر حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. با کمک نتایج بدست آمده و استاندارد مربوط به اندازه گیری و طراحی قطعات موتور هوایی نقشه اجرایی تهیه شده است. سپس با استفاده از ماشین تراش CNC، سوپر دریل، وایرکات و اسپارک عملیات ماشینکاری جهت ساخت پوسته انجام شده است. در فرآیند تراشکاری از پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و ابزار استفاده شده. تغییرات هر سه پارامتر ماشینکاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش) در تغییر نیرو هنگام ماشینکاری اینکونل تاثیر دارد. بیشترین تاثیر را با توجه به سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته عمق برش و نرخ پیشروی دارد. تاثیر نرخ پیشروی در تغییر زبری سطح بیش از عمق برش و سرعت پیشروی در ماشینکاری اینکونل می‌باشد.

پس از ساخت به بررسی الزامات فیزیکی قطعه مانند دقت ابعاد و اندازه مطابق با نقشه اجرایی و صافی سطح پرداخته شده است. قطعه نهایی از دقت ابعادی مناسب برخوردار است اما در مورد صافی سطح فقط قسمت‌هایی که تراشکاری شده است قابل قبول می‌باشد و قسمتی که با روش تخلیه الکتریکی ماشینکاری شده است از کیفیت مناسبی برخوردار نیست. با توجه به اینکه در این پایان نامه ساخت یک قطعه مد نظر بود استفاده از روش ماشینکاری مناسب می‌باشد. اگر تعداد قطعات زیاد شود این روش به دلیل دورریز زیاد ماده در اثر ماشینکاری و همچنین نرخ بالای سایش ابزار به دلیل جنس پوسته مناسب نمی‌باشد.

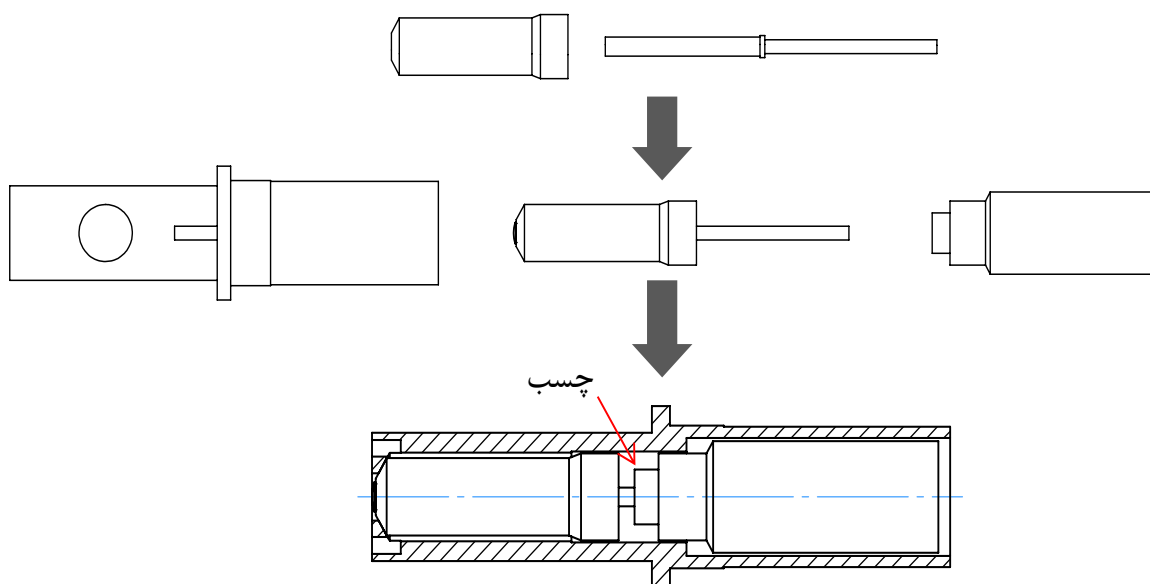
۵-۲- پیشنهادها

- برای ساخت تعداد زیاد از پوسته شمع موتور هوایی پیشنهاد می‌شود از روش ریخته گری دقیق استفاده شود.
- روش متالورژی پودر می‌تواند جایگزین مناسب برای ساخت پوسته با روش‌های دیگر باشد. استفاده از این روش باعث کاهش وزن مواد خام اولیه عدم نیاز به ماشینکاری ثانویه و کاهش هزینه تولید می‌شود. همچنین در فرآیند متالورژی پودر کنترل دقیق تر ریزساختار قطعه نسبت به قطعات ریخته و کار شده امکان پذیر است.
- در ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی جرقه‌هایی با زمان روشن کم و انرژی پایین و الکتروود مس - تنگستن برای کیفیت سطح مناسب پیشنهاد می‌شود.
- بهترین کیفیت سطح در ماشینکاری اینکونل سرعت برشی بالا 45 m/min نرخ پیشروی متوسط 0.08 rad/min و عمق برشی کمتر از 0.5 mm حاصل می‌شود.

پیوست ۱

مونتاژ شمع

پس از تولید اجزای شمع، ابتدا عایق سرامیکی سمت الکتروود بر روی مغزی فلزی سوار می‌شود و با عملیات شکل‌دهی نوک الکتروود انبساط یافته و عایق سرامیکی را در جای خود ثابت نگه می‌دارد. سپس با اعمال چسب مناسب قطعات روی هم مونتاژ می‌شوند. شماتیک این فرآیند در شکل (۱) نشان داده شده است. بسته به نوع چسب مورد استفاده ممکن است فرآیند مونتاژ در دمای بالا یا دمای محیط انجام شود. برای مونتاژ صحیح اجزای شمع نیاز به استفاده از ابزار (فیکسچر) خواهد بود.



شکل ۱- شماتیک فرآیند مونتاژ شمع

مشخصات فنی مهندسی و آزمون‌ها

بر مبنای سند "مشخصات طراحی مهندسی" (EDS) قطعه، که از سوی کارفرما در اختیار قرار داده شده است، شمع طراحی و ساخته شده باید سه گروه از آزمون‌ها را بگذراند.

الزامات فیزیکی و عملکردی: این الزامات باید در طراحی و ساخت قطعه رعایت شود. اطمینان از منطبق بودن بر این الزامات با انجام آزمون‌هایی روی قطعه امکان پذیر است، هرچند در این موارد جزئیات آزمون‌ها نیامده است.

آزمون‌های صلاحیت طراحی: این آزمون‌ها بر روی تعداد محدود و مشخصی از قطعات انجام می‌پذیرد. بر اساس این واقعیت که اگر تعدادی از قطعات، این آزمون‌ها را بگذرانند، قطعات مشابه دیگری هم که به روش مشابه تولید شده‌اند، می‌توانند این آزمون‌ها را بگذرانند، صلاحیت طراحی تایید می‌شود. معمولاً آزمون‌های تایید صلاحیت طراحی در مراحل اولیه توسعه محصول و پیش از تولید انبوه انجام می‌شود تا بازخوردهای آن در طراحی و ساخت لحاظ شده، از طراحی قطعه و روش‌های ساخت اطمینان حاصل شود. آزمون‌های صلاحیت طراحی معمولاً شرایطی سخت‌تر از شرایط کاری را برای تایید طراحی در نظر می‌گیرد.

آزمون‌های پذیرش قطعه: این آزمون بر روی تمامی قطعات انجام می‌شود و قطعات بر مبنای این آزمون‌ها پذیرش یا رد می‌شود.

الزامات فیزیکی

ابعاد و اندازه‌ها: ابعاد کلی، ابعاد مهم در نصب قطعه و اتصال کانکشن‌ها باید مطابق نقشه‌ها باشد. وزن: با حفظ الزامات عملکردی، وزن قطعه باید هرچه ممکن است کمتر باشد و از مقدار داده شده در نقشه بیشتر نباشد.

الزامات عملکردی

الزامات داده شده در این قسمت، ویژگی‌های طراحی می‌باشد. انطباق طراحی قطعات بر این الزامات، با آزمون مشخص می‌شود.

ارتعاشات*: آزمون دوام تحت شرایط ارتعاشی زیر در جهت شعاعی و محوری

جدول ۱ - آزمون دوام

محدوده‌ی فرکانسی (CPS)	دامنه ۲a (mm)	بار تولید شده	مدت زمان (hr)	معیار رد یا پذیرش
۱۴-۵	۱۲/۵			
۲۰-۱۵	۶	۵G	۱۵	قطعه باید تحت این شرایط عملکرد مطلوبی داشته، تخریب نشود.
۵۰-۲۱	۱	۱۰G		
۲۸۰-۱۸۰	۰/۰۶	۱۰G		

* بر اساس استاندارد MIL-810G انجام خواهد شد.

خوردگی در تماس با سوخت: هیچ قسمت از شمع نباید در اثر تماس با سوخت دچار خوردگی یا خرابی شود (با توجه به اینکه شمع در حین عملکرد یعنی در زمان احتراق و در دمای بالا با سوخت در تماس است، این آزمون هم‌زمان با آزمون ۳-۳-۶ انجام خواهد گرفت.

محدوده‌ی دمایی کارکرد: شمع باید به گونه‌ای طراحی شود در محدوده‌ی دمایی زیر بتواند کار کند.

جدول ۲ - محدوده‌ی دمایی کارکرد

ناحیه‌ی بالای فلنج	ناحیه‌ی زیر فلنج	معیار رد یا پذیرش
بیشینه دما (°C)	۴۰۰	۱۱۰۰
کمینه دما (°C)	-۵۵	-۵۵

ارتفاع: شمع باید برای کار تا ارتفاع ۵۵۰۰ پا از سطح دریا طراحی شود. با توجه به اینکه تنها متغیر مهمی که با تغییرات ارتفاع قطعه‌ی مورد نظر (شمع) را تحت تاثیر قرار می‌دهد و نیز با توجه به اینکه قطعه مورد نظر قبلاً "طراحی" شده است و آزمون‌های صلاحیت طراحی را گذرانده است و در اینجا تنها مهندسی معکوس خواهد شد، به نظر می‌رسد انجام آزمون‌های دوام و شوک حرارتی برای تامین این بند کفایت کند.

نشت الکتریکی: مقاومت عایق شمع باید دست کم ۱۰۰ kΩ باشد.

آزمون‌های "صلاحیت طراحی" و آزمون‌های "پذیرش قطعه"

آزمون‌های صلاحیت طراحی

این آزمون‌ها بر روی ۱۰ نمونه‌ی منتخب انجام می‌شود.

آزمون پارازیت: همه‌ی ۱۰ نمونه باید مورد آزمون پارازیت با شرایط زیر قرار گیرد. تداخل امواج رادیویی منتشر شده از طرف شمع، هنگامی‌که به عنوان یک عضو از مجموعه‌ی سیستم جرقه کار می‌کند، نباید از حدود زیر تجاوز کند.

جدول ۳ - آزمون پارازیت

تعداد نمونه‌ها	محدوده‌ی فرکانسی (MHz)	معیار رد یا پذیرش*
۱۰	۰/۵ تا ۱۵۰	مطابق استاندارد MIL-STD-464C

* در EDS، استاندارد MIL-I-6181 به عنوان مرجع ذکر شده است ولی این استاندارد هم اکنون کنار گذاشته شده است و استاندارد MIL-STD-461 و MIL-STD-462 مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

آزمون شوک حرارتی: شمع باید آزمون شوک حرارتی با مشخصات زیر را بگذراند.

جدول ۴ - آزمون شوک حرارتی

تعداد نمونه‌ها	شرایط آزمون	تکرار آزمون	معیار رد یا پذیرش
۴	سرد کردن طول ۲۵ mm از نوک الکترود تا ۱۸ °C و افزایش دما تا ۹۸۰ در مدت ۱۰ s (نرخ گرمایش °C/s (۹۸	۵ مرتبه	آسیب قابل مشاهده چون سوختگی، ذوب شدگی، یا شکستن سرامیک موجب رد شدن نمونه می‌شود.

آزمون رفتگی الکترود (Electrode erosion): آزمون رفتگی الکترود باید در شرایط زیر انجام شود.

جدول ۵ - آزمون رفتگی الکترود

تعداد نمونه‌ها	شرایط آزمون	زمان آزمون	معیار رد یا پذیرش
۲	طول ۲۵ mm از نوک الکترود در دمای ۹۸۰ °C و فشار گیج ۴۸۰ kPa قرار گرفته، شمع با نرخ دست کم ۵ جرقه بر ثانیه با انرژی J ۰/۵ در هر جرقه، به صورت پیوسته کار می‌کند.	۵۰ ساعت	فاصله‌ی هوایی جرقه نباید از مقدار مشخصی بیشتر شود.

آزمون شتاب: آزمون شتاب باید در شرایط زیر انجام شود.

جدول ۶- آزمون شتاب

تعداد نمونه‌ها	شرایط آزمون	زمان آزمون	تکرار آزمون	معیار رد یا پذیرش
۲	شتاب ۱۰ G در راستاهای محوری و شعاعی	دست کم ۱ ثانیه	۱۰ مرتبه	پس از آزمون، باید عملکرد شمع قابل قبول باشد.

آزمون ضربه: آزمون ضربه باید در شرایط زیر انجام شود.

جدول ۷- آزمون ضربه

تعداد نمونه‌ها	شرایط آزمون	تکرار آزمون	معیار رد یا پذیرش
۲	حداقل مقدار شتاب ۳۰ G در مدت زمان بیشتر یا مساوی ۱۰ ms	۴ مرتبه در هر کدام از راستاهای شعاعی و محوری	پس از آزمون، باید عملکرد شمع قابل قبول باشد.

آزمون دوام موتوری: ۲ نمونه از ۱۰ نمونه باید در توربین گازی، قابلیت کارکرد بدون نقص فنی به مدت ۱۵۰ ساعت را داشته باشد. این آزمون همچنین پیش از تایید قطعه برای تولید باید انجام شود.

آزمون‌های پذیرش قطعه

تمامی قطعات باید آزمون‌های زیر را بگذرانند.

آزمون نشت گاز: با قراردادن شمع در فشار ۷ bar به مدت ۲ min، نرخ نشت گاز نباید از cc/min ۵ بیشتر شود.

آزمون واماندگی عایق: با اعمال ولتاژ قله ۱/۵ kV به مدت ۳۰ s، عایق نباید سوراخ شده* (puncture) یا دچار خزش** (creepage) شود.

*شکست الکتریکی داخل بدنه‌ی عایق

**خزش یک جریان هدایتی کوچک بین دوهادی از طریق یک سطح واسطه است.

تجهیز پیشنهادی برای ایجاد شرایط آزمون موتوری

انجام آزمون دوام موتوری، آزمون رفتگی الکترو، آزمون شوک حرارتی، آزمون محدوده دمای کارکرد و آزمون خوردگی در تماس با سوخت جزء الزامات می باشد که برای انجام آنها در محیطی غیر از موتور، نیاز به تجهیز خاص می باشد. برای این منظور ابتدا شرایط کارکرد موتور برای این شمع مورد بررسی قرار می گیرد.

موتور J79-GE-17

این موتور توربوجت ساخت شرکت GE بوده و روی فانتوم F4-E نصب شده است. مشخصات عمده ای این موتور در جدول زیر آمده است:

جدول ۸ - مشخصات موتور J79-GE-17

Fuel type	Max rated airflow	Thrust to Weight Ratio	Combustion Chamber	Max Design Pressure Ratio, SLS
JP4 or JP5	170.0 lbs/s (77 kg/s)	4.6 : 1 45.4 N/kg	10 annular liners	Overall: 13.5 to 1

با توجه به شرایط داده شده در جدول بالا، جهت تخمین شرایط کاری موتور و به دست آوردن اعداد سرانگشتی، محاسبات زیر انجام شده است. بیشترین دمای هوای ورودی به لاینر در سطح زمین تقریباً برابر 360°C خواهد بود.

$$T_2 = T_1 r^{\frac{k-1}{k}}, T_2 = 300 \left(13.5^{\frac{1.4-1}{1.4}} \right) = 631 \text{ K} = 358^{\circ}\text{C}$$

همچنین بیشترین دبی هوای ورودی به اطراف و داخل هر لاینر (با صرف نظر کردن از هوای مصرفی برای خنک کاری) به صورت تقریبی برابر $7/7 \text{ kg/s}$ خواهد بود. بدترین شرایط کاری شمع با توجه به محاسبات بالا مشخص می شود. باید توجه داشت که در شروع به کار موتور یا در شرایط عادی، دبی جرمی و دمای هوای ورودی به لاینر پایینتر از این مقادیر خواهد بود. با توجه به اینکه شمع بر روی یک لاینر نصب می شود، برای ایجاد شرایط آزمون موتوری، باید شرایط کارکرد یک لاینر و محیط خارجی اطراف آن را فراهم نمود. با توجه به اعداد به دست آمده از محاسبات سرانگشتی بالا، می توان دریافت که انجام آزمون روی لاینر با ابعاد واقعی و در بدترین شرایط عملکردی نیازمند تامین مقدار

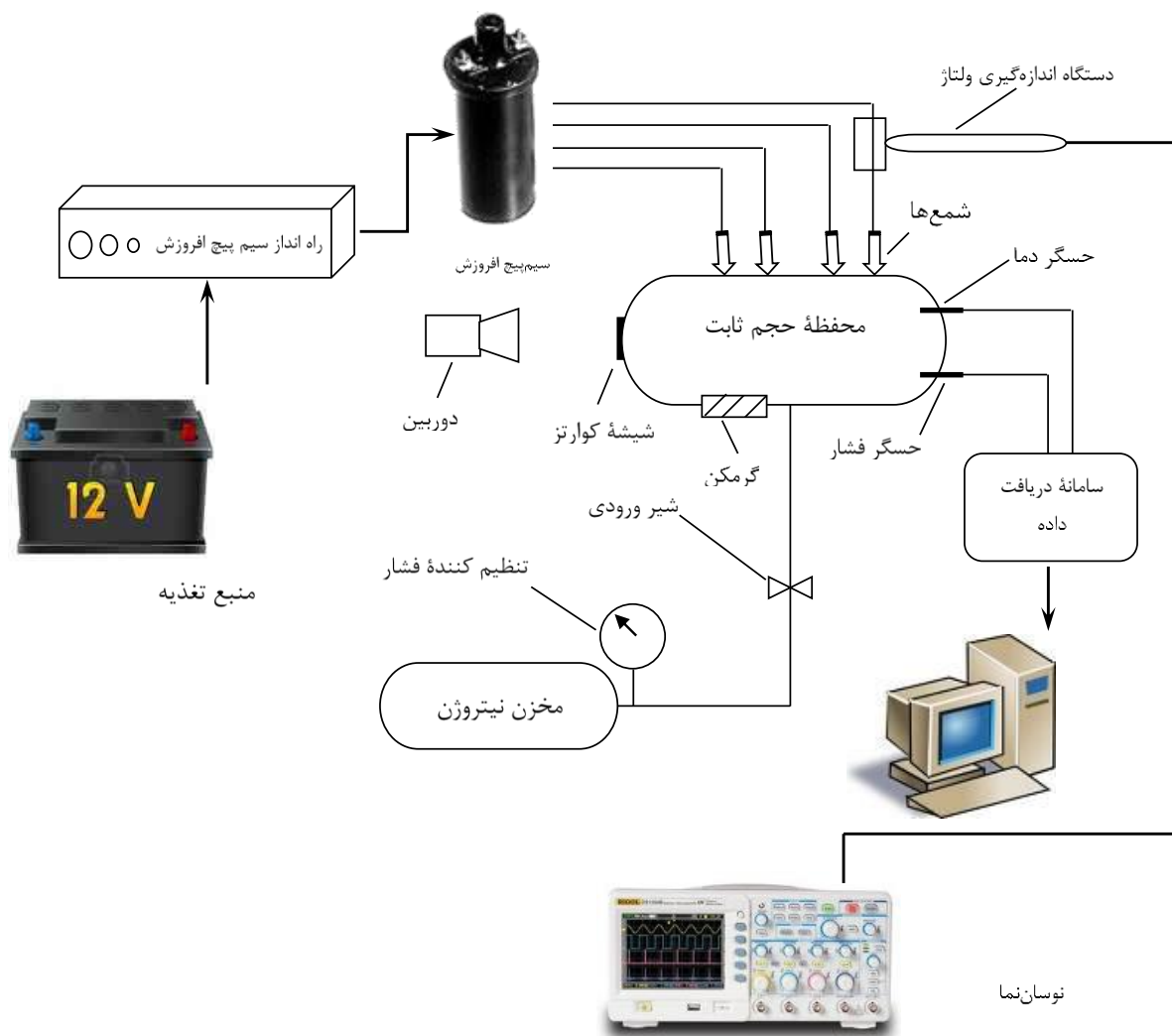
حجم زیادی هوای فشرده‌ی داغ است که این عملاً هزینه‌ی بسیار بالایی خواهد داشت. کمپرسور مورد نظر، باید توان تامین $386 \text{ m}^3/\text{min}$ در فشار ۱ bar را داشته باشد. علاوه بر این سوخت مورد نیاز برای مخلوط شدن و احتراق با این حجم هوا، بسیار زیاد خواهد بود. به ویژه، با توجه به مدت زمان بالای آزمون‌ها (۱۵۰ ساعت در مورد آزمون دوام موتوری) مصرف سوخت برای انجام یک آزمون بسیار بالا خواهد بود. علاوه بر این تاسیسات لازم برای هدایت محصولات احتراق، کنترل دما و... بسیار مفصل می‌شود. این عوامل باعث می‌شود انجام آزمون موتوری روی یک لاینر آزمایشگاهی با ابعاد واقعی هزینه‌ی بسیار بالایی در بر داشته باشد هرچند هزینه‌ی آن از انجام آزمون روی موتور در شرایط آزمایشگاهی پایین‌تر است.

برای کاهش هزینه‌های آزمون و برآوردن الزامات آن، ساخت یک مجموعه آزمون با محفظه‌ی احتراق در مقیاس کوچک (یک دهم) می‌تواند یک راه حل باشد. شماتیک این تجهیز در (شکل ۲) نشان داده شده است.

یک مجموعه‌ی پیشنهادی برای آزمون‌های دوام، رفتگی، خوردگی و شوک حرارتی شمع

تجهیز پیشنهادی برای آزمون‌های پذیرش قطعه

وضعیت جرقه زنی شمع و نیز هوابندی آن در فشارهای مختلف در دستگاه آزمون شمع بررسی می‌شود و قابلیت مشاهده نحوه جرقه زنی وجود دارد. در (شکل ۳)، شماتیک این دستگاه و اجزای جانبی آن نشان داده شده است.



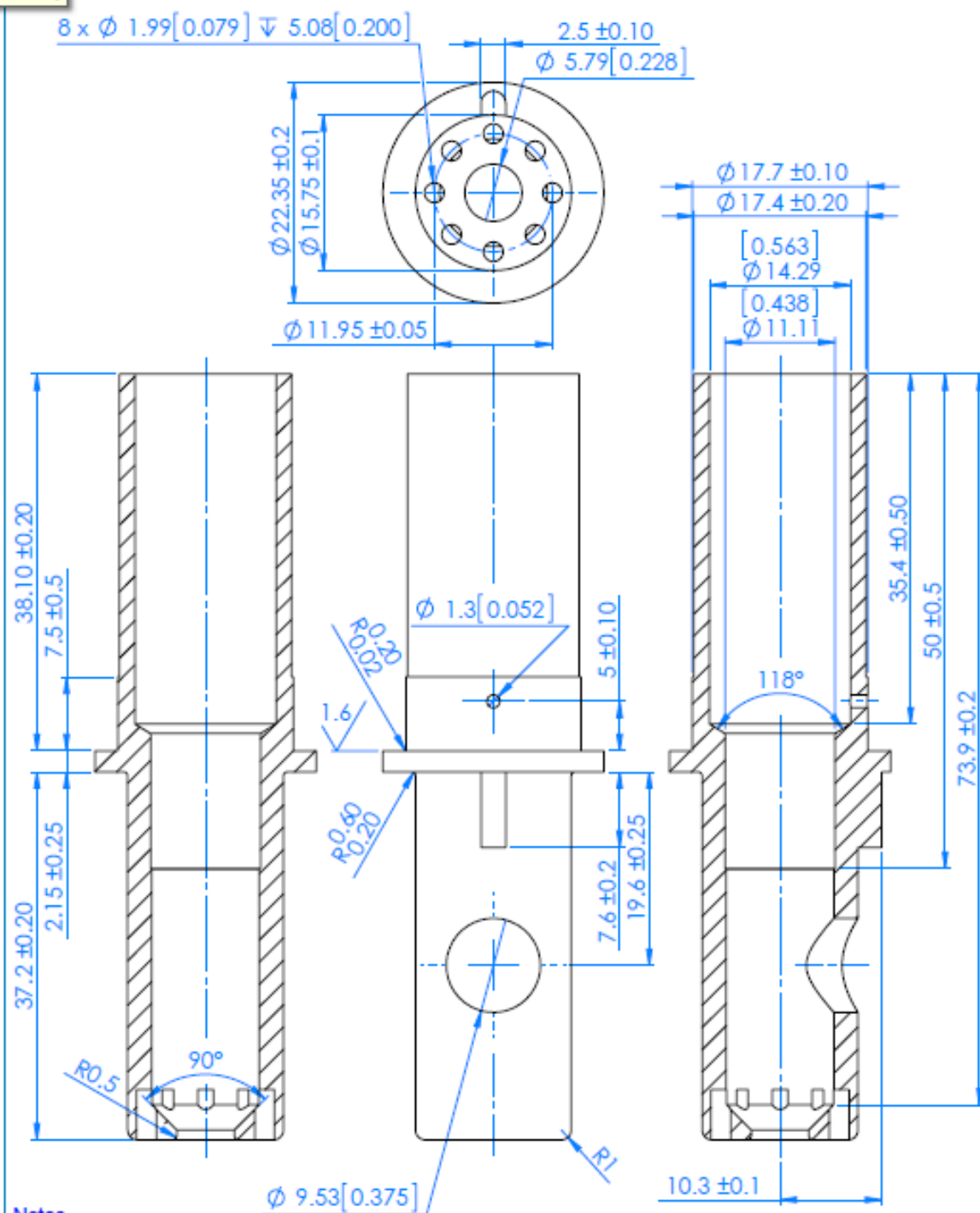
شکل ۳- شماتیک مجموعه‌ی پیشنهادی برای آزمون‌های پذیرش شمع

جدول ۹- آزمون‌های قطعه ای شمع

ردیف	مشخصه	توضیحات
۱	مشخصات عمومی (بازدید چشمی)	ISO 11565- 3.2
۲	اندازه گیری ابعاد	ISO 8470
۳	اندازه گیری مقاومت الکتریکی داخلی	ISO 11565-3.7.1
۴	عمر مقاومت الکتریکی داخلی	ISO 11565-3.8
۵	مقاومت مکانیکی بدنه	ISO 11565-3.4.1
۶	مقاومت خمشی ترمینال اصلی	ISO 11565-3.4.3
۷	آب بندی	ISO 11565-3.5
۸	ولتاژ قابل تحمل توسط عایق	ISO 11565-3.7.2
۹	ارتعاش	ISO 11565-3.4.4
۱۰	شوک حرارتی، مقاومت حرارتی	ISO 11565- 3.6
۱۱	شوک حرارتی الکترودها	EPN 00114- 3.2.1
۱۲	مقاومت الکتریکی عایق در دمای محیط	ISO 11565- 3.7.3
۱۳	مقاومت الکتریکی عایق در دمای بالا	ISO 11565-3.7.4
۱۴	پایداری مقاومت داخلی در حرارت	ISO 11565-3.9

پیوست ۲

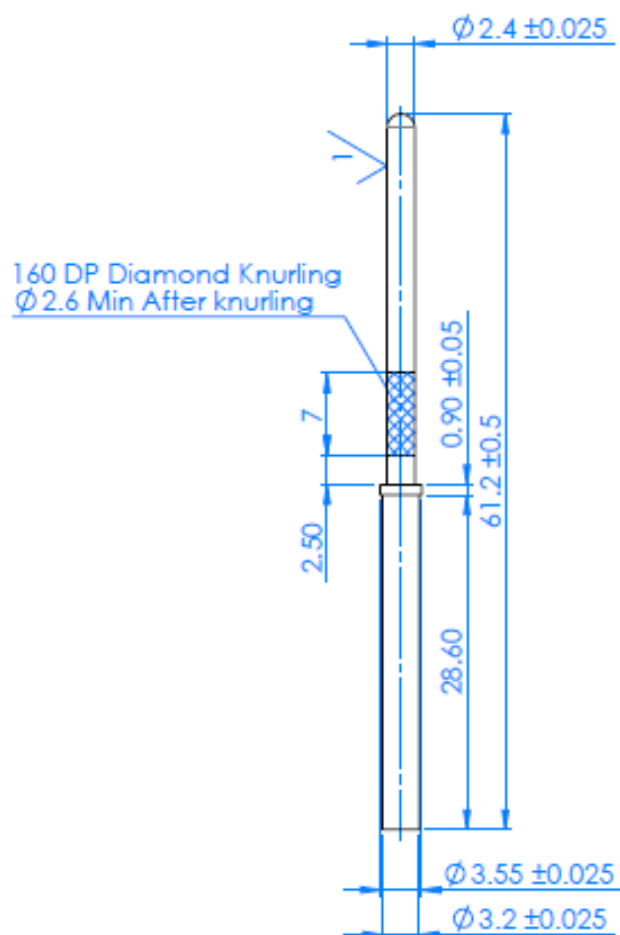
rl+Plus)



Notes

TITLE: Shell Machining					
EDITION: 1	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	
	MATERIAL: Inconel 600	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE: A4	SCALE: 2:1	UNIT: mm [in.]	DWG. No.:

نقشه نهایی پوسته شمع



Notes

TITLE: Electrode					
EDITION: 1	ISSUE:		DESIGNED	DRAWN	CHECKED
	MATERIAL: Hastelloy H-9M	NAME			
	TOLERANCE:	DATE			
	QUANTITY:	SIZE: A4	SCALE: 2:1	UNIT: mm [in.]	DWG. No.:

نقشه الکترود مرکزی

منبع ها

- [1]. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/trbtyp.html>
- [2]. the jet engine- Rolls-Royce plc 1986 - Fifth edition - Reprinted 1996 with revisions.
- [3]. Wharton, E., and Carr, E., "Starting Gas Turbine Engines," Journal of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 63, pp. 10-19, 1972.
- [4]. Watson, E. A., Ignition Research Work Carried Out by the Lucas Organization with Special Reference to High Altitude Problems, Report L5988, Lucas Aerospace, Ltd, Hempstead, UK, 1954.
- [5]. Odgers, J., and Coban, A., "The Energy Release to Static Gas from a 12 Joule High Energy Ignition System," ASME Paper 77-GT-18, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1977.
- [6]. West, H. E., "Development of High Energy Igniters for Gas Turbines," SAE Preprint 660346, 1966.
- [7]. Opdyke, G., "Development of an Annular Reverse-Flow Combustor," SAE Preprint 444E, 1962.
- [8]. Anon., KLG Ignition Equipment, Igniters and Glow Plugs, Smiths Aviation Division Maintenance Manual 74-20-102/01, 1961.
- [9]. Saintsbury, J. A., "A Glow Plug Ignition System for the Gas Turbine," SAE Paper 670937, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1967.
- [10]. Weinberg, F. J., Hom, K., Oppenheim, A. K., and Mechanisms, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 1755-65, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1981.
- [11]. Orrin, J. E., Vince, I. M., and Weinberg, F. J., "A Study of Plasma Jet Ignition Mechanisms," Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 1755 Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1981.
- [12]. Warris, A. M., and Weinberg, F. J., "Ignition and Flame Stabilization by Plasma Jets in Fast Gas Streams," Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. A-1825-31, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1984.
- [13]. Xiong, T. Y., Xiang, Z. X., and Wang, Y. Z., "Studies of Fuel Spray Ignition in Gas Turbine Combustor," unpublished report, Institute of Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing, 1979.
- [14]. Pavia, R. E., and Rosenthal, J., "The Extension and Extinction Limits of Derwent and Avon Combustors by Alternative Methods of Oxygen Addition," ARL/ME-Note-204, Aeronautical Research Laboratory, Melbourne, Australia, 1955
- [15]. Bloch, H. P. Practical Lubrication for Industrial Facilities. Lithburn, GA: Fairmont Press, 2000
- [16]. Armstrong, J. C., and Wilsted, H. D., "Investigation of Several Techniques for Improving Altitude-Starting Limits of Turbojet Engines," NACA RM E52103, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC, 1952
- [17]. Gas Turbines - A Handbook of Air, Land and Sea Applications - Second Edition

- [18]. ASM HAND BOOK/ VOLUME 3/Alloy phase Diagrams
- [20]. ASM HAND BOOK / VOLUME 9 / Metallography and Microstructures/ 2004
- [21]. ASM Metals Reference Book, 3rd Edition /edited by Michael Bauccio
- [22]. Mechanical Engineer's Reference Book / edited by A. Parrish
- [23]. Smithells Metals Reference Book / edited by William F. Gale, Terry C. Totemeier
- [24]. ASM Handbook Volume 02: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials
- [25]. Superalloys: A Technical Guide, 2nd Edition / By Matthew J. Donachie, Stephen J. Donachie
- [26]. Developments in Rapid Casting / By G. Tromans
- [27]. Materials and Manufacturing Processes / Volume 26, 2011 - Issue 8
- [28]. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) /Original Research Article International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issues 7-8, June 2007, Pages 1214-1228 / Norliana Mohd Abbas, Darius G. Solomon, Md. Fuad Bahari
- [29]. D.G. Thakur , B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, "Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning", Materials and Design 30 (2009)1718-1725.
- [30]. I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, Machinability of nickel base super alloys: a general review, Proc. Advances in Materials and Processing Technologies AMPT'95, vol. III, Dublin, Ireland, 1995, pp. 1405-1413.
- [31]. D.Y. Jang, J.H. Liou, T.R. Watkins, K.J. Kozaczek, C.R. Hubbard, "Characterization of surface integrity in machined austenitic stainless steel, Manufacturing Science and Engineering, " MED 3 (1) (1995) 399-413.
- [33]. N. Bani Mostafa Arab, Advanced Machining Process, Tehran: Azadeh, pp.151-167, 2006
- [19]. کتاب سوپرآلیاژها / راهنمای علمی و کاربردی / ویرایش دوم / مترجمین: حجت‌الضا‌عالی - حسن غیاثوند - محمد رهگذر / انتشارات جهان جام جم
- [32]. بررسی شرایط بهینه ماشینکاری سوپرآلیاژ اینکونل 718 با رویکرد طراحی آزمایش تاگوچی / فرهاد کلاهان - محمدحسین یاری بخت / دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک / سومین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید اسفند ماه ۱۳۹۰

Abstract

Spark plug is a tool for transferring alternating sparks into the combustion chamber. In jet engines, combustion and flame are initiated by spark plugs. Aerial engine spark plug consists of main components including metal body, ceramic insulator, central electrode and airtight sealing adhesive. In this dissertation manufacturing of the metal shell of the spark plugs in jet engine J79-17 is dealt with. First a sample of the component is obtained. Upon dismantling the parts followed by dimensional measurement, engineering drawing of the metal shell was developed. In addition, a sample of the metallic part was sent to laboratory for characterization. Using the optical emission spectroscopy, it is confirmed that the shell is made of nickel based Inconel 600 superalloy. The tolerances of the components were determined based on the finite element analyses in Abaqus and applied in the drawing. Inconel 600 raw material in shaft format was purchased. Due to the limited quantity of parts needed and geometrical features, and available equipment, machining and spark method is selected for production. After the production, tests are performed on the shell and features such as visual test, dimensional accuracy and surface smoothness are studied.

Keywords: spark plug, superalloy, machining, Inconel, Hestelloy



**Shahrood University of Technology
Kharazmi Campus
MSC Thesis in Science
of Mechanical Engineering**

**Fabrication of the super-alloy shell and electrode of an aerial engine
igniter plug through investment casting and machining**

By: Seyed Amirhossein Alavi

Supervisor:

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

September 2016