



سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

عنوان طرح:

دستیابی به دانش فنی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی

عنوان مدرک:

گزارش نهایی فاز اول طرح تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی

مجری:

حسین امینی مشهدی

خردادماه ۱۴۰۰



فهرست مطالب

۱- فصل اول: آشنایی با مبدل کاتالیستی و عملکرد آن	۲
۱-۱ - مقدمه	۳
۱-۲ - مبدل‌های کاتالیستی	۴
۱-۳ - ساختار مبدل‌های کاتالیستی	۵
۱-۳-۱ - زیرکار	۵
۱-۳-۲ - پوشش	۷
۱-۳-۳ - کاتالیست	۸
۱-۳-۴ - پوسته	۸
۱-۴ - مراحل تولید مبدل کاتالیستی پایه فلزی	۱۰
۲ - فصل دوم: مروری بر اقدامات انجام شده	۱۲
۲-۱ - تهیه نمونه مرجع مبدل کاتالیستی فلزی	۱۳
۲-۲ - مهندسی معکوس نمونه مرجع و استخراج مشخصات آن	۱۶
۲-۲-۱ - تعیین ضخامت و جنس ورق	۱۶
۲-۲-۲ - تعیین جنس پوشش و ذرات کاتالیستی	۱۹
۲-۲-۳ - بررسی ریزساختاری ورق	۲۱
۲-۲-۴ - تعیین ابعاد هندسی مبدل، فرم و شکل کرکره‌های داخلی	۲۲
۲-۳ - تهیه ورق نازک فولاد ضدزنگ مقاوم به حرارت	۲۵
۲-۴ - طراحی و ساخت دستگاه فرم‌دهی ورق	۲۶
۲-۵ - بررسی پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده	۳۲
۲-۵-۱ - ورق کرکره‌ای شده اولیه	۳۲
۲-۵-۲ - ورق کرکره‌ای شده با عرض ۱۲ سانتیمتر	۳۳

۳۶	۲-۶ - بررسی آلیاژ مورد استفاده در پینهای نمونه مرجع
۳۷	۲-۷ - تهیه فولاد مناسب و ساخت پین
۳۹	۲-۸ - امکان‌سنجی تولید ورق نازک فولاد ضدزنگ مقاوم به حرارت
۴۵	۲-۹ - طراحی و ساخت دستگاه تابانیدن
۴۹	۲-۱۰ - بررسی مونولیت فلزی خام تولید شده
۵۱	۳ - فصل سوم: جمع‌بندی
۵۳	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- تصویری شماتیک از یک مبدل کاتالیستی و اجزای آن. ۶
- شکل ۲-۱- مقایسه زیرکار فلزی و سرامیکی در مبدل‌های کاتالیستی. ۷
- شکل ۳-۱- تصویری از نمونه‌های مبدل کاتالیستی پایه فلزی. ۹
- شکل ۱-۲- تصاویر نمونه مرجع مبدل کاتالیستی فلزی دریافتی از شرکت زامیاد. ۱۳
- شکل ۲-۲- نقشه فنی نمونه مرجع دریافت شده از شرکت زامیاد. ۱۴
- شکل ۳-۲- تصویر نمونه‌های کارکرده دریافتی از شرکت زامیاد، موقعیت مبدل کاتالیستی در درون سیستم‌آگزوز نیز برای هر نمونه مشخص شده است. ۱۵
- شکل ۴-۲- اندازه ضخامت ورق در نمونه مرجع. ۱۶
- شکل ۵-۲- تصویر گواهی ضخامت‌سنجی ورق نمونه مرجع توسط آزمایشگاه مواد و متالورژی پارک علم و فناوری خراسان. ۱۷
- شکل ۶-۲- گواهی آزمون XRF مربوط به ورق نمونه مرجع. ۱۸
- شکل ۷-۲- تصویر SEM و نتیجه آنالیز EDS انجام شده بر روی ورق نمونه مرجع. ۱۹
- شکل ۸-۲- تصاویر SEM پوشش در دو بزرگنمایی به همراه طیف حاصل از آنالیز EDS بر روی نمونه مرجع. ۲۰
- شکل ۹-۲- تصویر ریزساختار ورق فولادی نمونه مرجع، (الف) و (ب) در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، (ج) و (د) در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر. ۲۱
- شکل ۱۰-۲- اندازه‌گیری ضخامت ورق و پوشش نمونه مرجع پس از حکاکی. ۲۲
- شکل ۱۱-۲- تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از دو قسمت مختلف مبدل کاتالیستی مرجع. ۲۳
- شکل ۱۲-۲- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق نمونه مرجع (در حالت تابانیده شده)، (الف) دامنه، (ب) طول موج و (ج) شعاع راس کرکره‌ها. ۲۳
- شکل ۱۳-۲- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق نمونه مرجع (در حالت باز و مانت شده)، (الف) دامنه، (ب) طول موج و (ج) شعاع راس کرکره‌ها. ۲۴

شکل ۱۴-۲- تصویر ریزساختار الف) ورق خریداری شده، ب) ورق نمونه مرجع در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر.

۲۶.....

شکل ۱۵-۲- نتیجه اندازه‌گیری ضخامت بر روی تصاویر میکروسکوپی ورق خریداری شده، الف) قبل از

حکاکی، ب) بعد از حکاکی.

شکل ۱۶-۲- دستگاه شکل‌دهی اولیه.

شکل ۱۷-۲- برخی از قطعات و تجهیزات تهیه شده برای ساخت دستگاه شکل‌دهی، الف) قالب‌ها، ب)

میکروسوئیچ‌ها و ج) موتور.

شکل ۱۸-۲- تصویری از دستگاه شکل‌دهی آزمایشی اولیه برای کرکره‌ای کردن ورق.

شکل ۱۹-۲- تصاویری از دستگاه فرم‌دهی طراحی و ساخته شده پس از اصلاحات اولیه.

شکل ۲۰-۲- تصویری از قسمت راهنما که بر روی دستگاه نصب خواهد شد.

شکل ۲۱-۲: تصاویری از مراحل تکمیل ساخت دستگاه فرم‌دهی ورق.

شکل ۲۲-۲: تصاویری از دستگاه فرم‌دهی پس از تکمیل مراحل ساخت.

شکل ۲۳-۲: بخشهای مختلف دستگاه فرم‌دهی طراحی و ساخته شده.

شکل ۲۴-۲: دو مجموعه غلطک فرم‌دهی طراحی و ساخته شده.

شکل ۲۵-۲- ورق کرکره‌ای شده.

شکل ۲۶-۲- تصاویر میکروسکوپی ورق کرکره‌ای شده پس از قرارگیری در مانت به همراه نتایج

اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده اولیه، الف) دامنه، ب) طول موج و ج) شعاع راس

کرکره‌ها.

شکل ۲۷-۲- تصویری از ورق کرکره‌ای شده با عرض ۱۲ سانتیمتر.

شکل ۲۸-۲- تصاویر میکروسکوپی ورق کرکره‌ای شده با عرض ۱۲ سانتیمتر پس از قرارگیری در مانت

به همراه نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده اولیه، الف) دامنه، ب) طول موج و ج)

شعاع راس کرکره‌ها.

شکل ۲۹-۲- تصاویر ورق کرکره‌ای شده به عرض ۱۲ سانتیمتر پس از اصلاح دستگاه فرم‌دهی و اضافه

شدن راهنما.

- شکل ۳۰-۲- تصاویر ریزساختار پین مورد استفاده در نمونه مرجع در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر. ۳۷
- شکل ۳۱-۲: گواهی آزمون کوانتومتری انجام شده بر روی آلیاژ تهیه شده برای ساخت پین. ۳۸
- شکل ۳۲-۲- طرح شماتیک روش نوردهی خوشه‌ای. ۴۰
- شکل ۳۳-۲- طرحی از خط تولید نوردهی خوشه‌ای. ۴۱
- شکل ۳۴-۲- آمار واردات مجموعه مرتبط با مبدل‌های کاتالیستی خودرو. ۴۳
- شکل ۳۵-۲- آمار واردات ورق‌های فولاد ضدزنگ نوردهی با ضخامت کمتر از ۰/۵ میلیمتر. ۴۴
- شکل ۳۶-۲: برخی مواد و تجهیزات تهیه شده به منظور ساخت دستگاه تابانیدن. ۴۵
- شکل ۳۷-۲: تصاویری از مراحل ساخت بدنه و اجزا دستگاه تابانیدن. ۴۶
- شکل ۳۸-۲: بخش‌های مختلف دستگاه تابانیدن. ۴۷
- شکل ۳۹-۲: منطقه تابانیدن دستگاه. ۴۸
- شکل ۴۰-۲- قالب نهایی ساخت مونولیت. ۴۸
- شکل ۴۱-۲: ظاهر نهایی دستگاه تابانیدن. ۴۹
- شکل ۴۲-۲- تصویر نمونه مونولیت خام تولید شده در کنار نمونه مرجع از دو نمای مختلف. ۵۰
- شکل ۴۳-۲: نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی مونولیت خام تولید شده، الف) دامنه، ب) طول موج و ج) شعاع راس کرکرها. ۵۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مشخصات فنی مبدل کاتالیستی پایه فلزی تولید شرکت داینکس ۱۰
- جدول ۱-۲- نتایج آزمون XRF پوشش نمونه مرجع (اعداد بر حسب درصد) ۲۰
- جدول ۲-۲- برخی مشخصات ورق فولادی تهیه شده ۲۵
- جدول ۳-۲- ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۴۸۲۸ مورد استفاده در ساخت پین نمونه مرجع (اعداد بر حسب درصد) ۳۶
- جدول ۴-۲- برخی مشخصات فولاد تهیه شده برای ساخت پین ۳۷



پیشگفتار:

میلیون‌ها وسیله نقلیه در سرتاسر جهان در حال تردد می‌باشند که هر کدام به عنوان یک منبع آلودگی به شمار می‌روند. این مورد خصوصاً در شهرهای بزرگ به عنوان مسئله‌ای بزرگ از زمان‌های قدیم مورد بحث بوده است. جهت حل این مشکل قوانینی به مرحله اجرا در آمده است که مقادیر آلاینده خروجی از سیستم‌های اگزوز خودروها را تحت کنترل درآورده و محدود کرده است. به همین منظور کارخانجات خودروسازی سیستم‌های پالایش‌کننده‌ای را جهت کنترل مقادیر آلاینده خروجی از سیستم‌های موتور و سوخت‌رسانی تهیه و مورد بهره‌برداری قرار داده‌اند. یکی از این سیستم‌ها مبدل‌های کاتالیستی هستند که با هدف کاهش آلودگی گازهای خروجی از اگزوز وسایل نقلیه در آن‌ها نصب می‌شود. در ایران، در حال حاضر این مبدل از طریق واردات تامین و در اختیار سازندگان وسایل نقلیه قرار می‌گیرد که علاوه بر خروج ارز سبب افزایش قیمت تمام شده خودرو نیز می‌شود.

مبدل کاتالیستی وسیله‌ای است که امروزه^۱ در سیستم اگزوز اکثر وسایل نقلیه از جمله خودروهای سواری و موتورسیکلت‌ها و حتی در وانت و ماشین‌های باری به کار گرفته می‌شود تا بدین وسیله آلاینده‌های شیمیایی مانند منوکسیدکربن، اکسید نیتروژن و هیدروکربن‌ها را تبدیل به ترکیبات بی‌ضرر نماید. مبدل کاتالیستی از سال ۱۹۹۲ در تمام خودروهای اروپائی به کار رفته است و کشورهای عضو EEC از پیش‌تازان تولید مبدل‌های کاتالیستی در کل اروپا بوده‌اند. این کشورها ابتدا استفاده از مبدل‌های کاتالیستی را با ماشین‌هایی که نزد خریداران طرفدار بیشتری داشتند، شروع کردند و سپس آن را به سایر خودروها و وسایل نقلیه موتوری تعمیم دادند تا جائی که امروزه بالغ بر ۲۰۰۰ نوع از انواع کاتالیست تولید می‌کنند که در اروپا، آسیا و آمریکا و در طیف وسیعی از خودروها و وسایل نقلیه موتوری به کار می‌رود. استاندارد خاص و مدونی برای مبدل‌های کاتالیستی وجود ندارد و فقط دو حد مجاز اروپائی و آمریکایی برای مقدار گازهای مضر که وسایل نقلیه تولید می‌کنند، به رسمیت شناخته می‌شود [۱].

متأسفانه تکنولوژی ساخت مبدل‌های کاتالیستی هنوز در کشور تدوین نشده است و اکثر قطعات آن وارداتی است. با توجه به دستورالعمل‌ها و بخشنامه‌های محیط زیست برای تولید خودروهای جدید، استفاده از این قطعات در صنایع خودروسازی کشور الزامی است. لذا با توجه به مصرفی بودن این قطعات و استفاده زیاد آن‌ها در صنایع خودروسازی، رسیدن به دانش فنی تولید این قطعات گامی موثر در رفع وابستگی و اشتغال‌زایی خواهد بود.

^۱ Catalytic Converter



سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

عنوان طرح: دستیابی به دانش فنی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی

فصل اول:

آشنایی با مبدل کاتالیستی و عملکرد آن



۱-۱- مقدمه

گازهایی که در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی متصاعد شده و باید از ورود آن‌ها به محیط خودداری شود، عبارتند از:

الف- منوکسید کربن: این گاز بی‌رنگ، بی‌بو، بدون طعم و مزه بوده و در صورت تنفس مسموم‌کننده است؛ زیرا در شش‌ها جذب خون گردیده و مانع از جذب اکسیژن می‌گردد. جذب مقدار کمی از آن باعث سردرد و کم‌شدن فعالیت‌های مغزی شده و جذب مقدار زیادی از آن بیهوشی و مرگ را به همراه دارد. بطور کلی، منوکسید کربن باعث بیماری‌های قلبی و عروقی، رفتارهای سوء عصبیو تاثیرات منفی بر جنین می‌گردد. در هوای آزاد بدن انسان می‌تواند منوکسید کربن را از خود دفع نماید به شرط آن که به مقدار زیاد در معرض آن قرار نگیرد [۲].

در اثر سوخت‌های فسیلی، هنگامی که مقدار هوای موجود کمتر از مقدار مورد نیاز باشد، احتراق ناقص صورت می‌گیرد. اگر تنها مقدار کمی هوا موجود باشد، نتیجه معمول این‌گونه است که تعدادی از بخش‌های کربنی با اکسیژن واکنش داده و بجای تولید CO_2 ، CO تولید می‌گردد [۲].

ب- هیدروکربن‌های نسوخته: زمانی که مخلوط سوخت (ترکیب هوا و سوخت فسیلی) برای انفجار وارد سیلندر شده و جرقه زده می‌شود، مولکول‌های بیرونی شاخه‌های کربنی که در معرض اکسیژن قرار دارند به خوبی سوخته و حاصل این سوختن دی‌اکسید کربن و آب می‌باشد. در عمل مولکول‌های مرکز شاخه‌های مرکز شاخه‌های هیدروکربنی در اثر ناقص‌سوزی، نمی‌سوزد و بصورت هیدروکربن‌های نسوخته نیز در محصولات احتراق موجود می‌باشد. بنابراین گازهای خروجی اگزوز در بردارنده ترکیبات هیدروکربنی بسیاری می‌باشند که اکثراً بدون ضرر اما قابل احتراق هستند. در عین حال برخی از هیدروکربن‌ها پتانسیل سرطان‌زایی داشته و همچنین می‌توانند سبب تحریک چشم‌ها و مخاط گلو شوند. هیدروکربن‌ها در تشکیل باران‌های اسیدی نقش دارند و همچنین بعضی از ترکیبات آن‌ها در مقابل اشعه ماوراء بنفش و در تشکیل گرد و غبار شیمیایی موثر می‌باشند [۳و۲].

ج- اکسیدهای نیتروژن (NO_x): اکسیدهای نیتروژن (NO_x) یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا می‌باشند که طی واکنش‌های احتراق در دماهای بالا تولید می‌شوند. سوختن نیتروژن و اکسیژن در کنار هم مخلوط اکسید نیتروژن را به وجود می‌آورد. اکسید نیتروژن می‌تواند تبدیل به منوکسید نیتروژن (NO) شود که گازی بدون بو، رنگ و طعم می‌باشد که در مجاورت بیشتر اکسیژن به راحتی به دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) که گازی به رنگ قرمز متمایل به قهوه‌ای است تبدیل می‌شود. این گاز سمی دارای بوی نافذی است



که باعث از بین رفتن بافت شش‌ها می‌گردد. این گازها به صورت ترکیبی و در کنار هم متصاعد می‌شوند به همین جهت فرمول کلی NO_x به آن‌ها اطلاق می‌شود که پسوند x در بردارنده طیفی از یک و دو اتم می‌باشد. اکسید نیتروژن در ترکیب با آب تشکیل باران اسیدی می‌دهد که ترکیب پیچیده‌ای از اسید نیتروژنی است و برای محیط زیست زیان‌آور می‌باشد. در شرایط خاصی از ارتفاع و یا تابش شدید آفتاب و رطوبت زیاد، اکسید نیتروژن در ترکیب با هیدروکربن باعث تشکیل گرد و غبار می‌شود. موتورهای با قابلیت احتراق کم در درجه حرارت بالاتری عمل می‌کنند. در نتیجه نیتروژن موجود در هوا را با اکسیژن بیشتری می‌سوزانند و به این ترتیب مقدار زیادی دی اکسید نیتروژن به وجود می‌آورند که این امر باعث تولید مقادیر بیشتری از باران‌های اسیدی در اتمسفر می‌شود [۳ و ۲].

د- سرب: سرب فلز سمی و سنگینی است که خاصیت مسموم‌کنندگی بالایی داشته و برای بافت مغز و دستگاه عصبی و همچنین حیوانات و گیاهان زیان‌آور است. بدن از دو راه سرب را جذب می‌نماید: اول از طریق شش‌ها و به هنگام تنفس و دوم از طریق دستگاه گوارش و از راه خوراکی‌های آلوده به سرب. سرب به عنوان یک افزودنی در سوخت خودرو و به دو حالت تترااتیل و تترااتیل سرب به کار می‌رود که باعث یکنواختی احتراق می‌گردد. در حدود ۱۰٪ از این سرب به شکل ذرات با قطر کمتر از 2.5×10^{-6} میلیمتر در هوا متصاعد می‌شود که امکان این که در هوا به صورت معلق باقی بمانند وجود دارد. ۲۵٪ از این سرب هم با روغن‌های تسهیل‌کننده مخلوط می‌گردد و یا در سیستم اگزوز باقی می‌ماند. مقداری از سرب نیز به سرعت در هوا تجزیه شده و نشست می‌کند [۲].

مبدل‌های کاتالیستی که امروزه در اکثر کشورها استفاده می‌گردند، یک روش مناسب برای کاهش گازهای آلاینده خروجی از خودروها می‌باشند. این مبدل‌ها در سیستم اگزوز خودرو قرار خواهند گرفت. گازهای مضر و آلاینده موجود در گاز اگزوز در تماس با مبدل کاتالیستی به گازهای بی‌ضرر تبدیل شده و سپس وارد محیط خواهند شد. در ادامه این فصل به توضیحاتی در خصوص مبدل‌های کاتالیستی خواهیم پرداخت.

۱-۲ - مبدل‌های کاتالیستی

مبدل کاتالیستی وسیله‌ای است که در سیستم خروجی موتور خودرو نصب می‌گردد و با استفاده از کاتالیزورها سه ترکیب مضر خروجی از موتور را به ترکیبات بی‌ضرر تبدیل می‌کند. این ترکیبات مضر عبارتند از:

- مونوکسید کربن (ناشی از سوختن بنزین)



- هیدروکربن‌ها (ناشی از احتراق بنزین)

- اکسیدهای نیتروژن (ناشی از ترکیب نیتروژن خروجی از موتور با هوا)

مبدل‌های کاتالیستی از طریق فراهم آوردن یک محیط واکنش‌دهنده همانند یک راکتور شیمیایی عمل کرده و باعث اکسیداسیون گازهای HC و CO و احیای NO_x می‌شوند [۲].

برای آغاز یک واکنش شیمیایی باید مقدار انرژی فعال‌سازی به حد مشخصی برسد. مبدل کاتالیستی مقدار انرژی لازم برای اکسیداسیون گازهای HC و CO و احیای NO_x را پایین می‌آورد و نیز سرعت انجام واکنش را افزایش می‌دهد. با استفاده از مبدل کاتالیستی، درجه حرارت لازم برای شروع واکنش‌های مذکور به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. در ابتدا برای کاهش آلاینده‌هایی مانند مونواکسید کربن و هیدروکربن-های نسوخته از کاتالیست‌های اکسید کننده (دوراهه) در مبدل‌ها استفاده می‌گردد. با سخت‌تر شدن استانداردهای کنترل آلودگی هوا به خصوص در زمینه انتشار اکسیدهای نیتروژن، استفاده از کاتالیزورهایی که بتوانند همزمان با اکسیداسیون مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته، احیای اکسیدهای نیتروژن را نیز تسریع نماید مورد توجه قرار گرفت. امروزه استفاده از کاتالیست‌هایی که به طور همزمان عمل تبدیل هر سه نوع آلاینده را انجام دهند، مد نظر است. به این نوع کاتالیست‌ها، کاتالیست‌های سه راهه می‌گویند [۵ و ۴].

۱-۳ - ساختار مبدل‌های کاتالیستی

مطابق شکل ۱-۱ مبدل‌های کاتالیستی از اجزا کوچکتری تشکیل شده‌اند که عبارتند از:

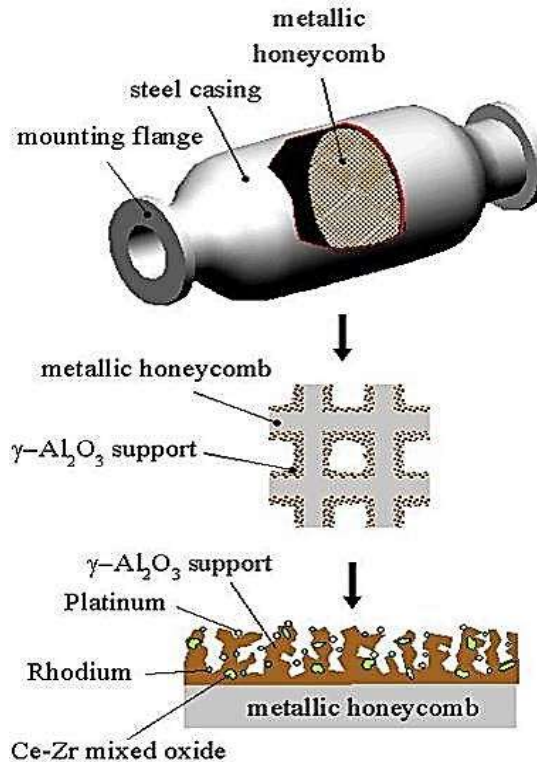
۱-۳-۱ - زیرکار

در مبدل‌های کاتالیستی خودروها، زیرکار یک قطعه لانه زنبوری سرامیکی یا فلزی است. زیرکار باید به گونه‌ای باشد که سبب افت فشار شدید در جریان گاز اگزوز نشود، همچنین باید در مقابل سایش، ضربات مکانیکی و شوک حرارتی مقاوم باشد. زیرکارها به دو فرم دانه‌ای و مونولیت ساخته می‌شوند که استفاده از مونولیت به این دلیل که موجب افت فشار کمتر نسبت به فرم دانه‌ای خواهد شد رایج‌تر است. جنس زیرکار در مبدل‌ها تعیین‌کننده قیمت تمام شده ساخت است. در صورت استفاده از زیرکار سرامیکی هزینه تولید انبوه بسیار پایین است اما زیرکارهای فلزی را با هزینه به نسبت بیشتری باید تولید نمود. هر کدام از این دو

^۱ Substrate

^۲ Monolith

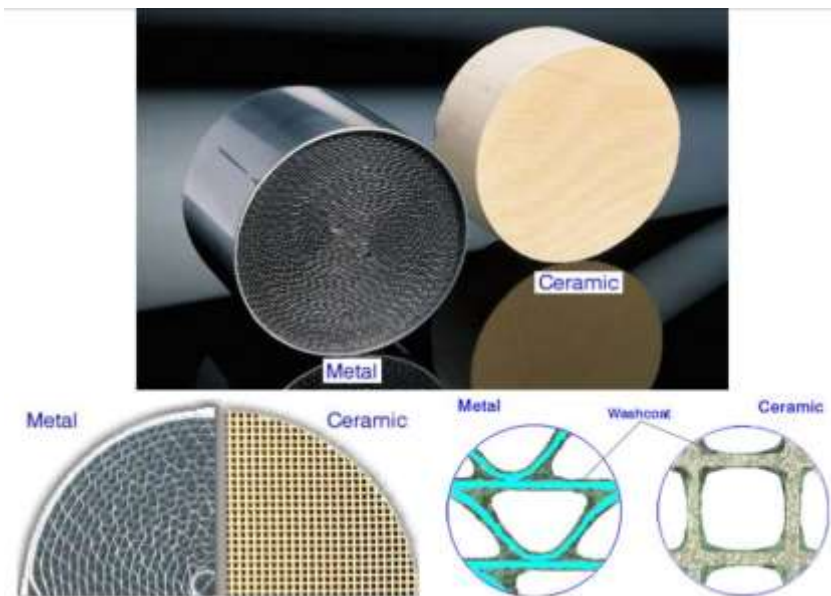
نوع زیرکار (سرامیکی یا فلزی) به گونه‌ای طراحی می‌شوند که سطح بیشتری را برای کاتالیست تامین کنند تا پالایش گازهای آلاینده به صورت بهتری انجام شود [۲].



شکل ۱-۱- تصویری شماتیک از یک مبدل کاتالیستی و اجزای آن.

شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از زیرکار فلزی و سرامیکی نشان می‌دهد. زیرکار سرامیکی غالباً از جنس کوردیت می‌باشد، که به دلیل ضریب انبساط حرارتی خیلی پایین در مقابل شوک حرارتی مقاوم است. زیرکارهای فلزی دارای مقاومت مکانیکی بیشتر نسبت به نوع سرامیکی می‌باشند. هدایت حرارتی بالاتر آن‌ها باعث کاهش احتمال ایجاد نقاط داغ موضعی شده و به علت ظرفیت حرارتی پایین در مدت استارت زدن خودرو، زودتر به دمای عملکرد می‌رسند. گازهای خروجی در یک موتور بنزینی در حد ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دارند در حالی که ممکن است این درجه حرارت در حالت عمل با بار کامل به ۹۰۰ درجه سانتیگراد هم برسد. شاخص تحمل درجه حرارت برای یک مبدل مطلوب بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد است. بنابراین مبدل‌ها باید به نحوی ساخته شوند که طیف حرارتی بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد را تحمل نمایند. اگر درجه حرارت مبدل در اگروز برای مدتی به ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برسد، فلز اصلی مبدل و پوشش لایه‌ای آن دچار تفجوشی شده و در نتیجه از عمر آن کاسته می‌شود. عمر مفید یک مبدل در شرایط ایده‌آل در حدود ۱۰۰,۰۰۰ کیلومتر می‌باشد. اعمال فشار بیش از حد به موتور و در نتیجه هدر

رفتن انرژی می‌تواند موجب بالا رفتن درجه حرارت گازهای خروجی از آگروز گردد. اگر این حرارت از ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد بالاتر رود موجب ذوب شدن لایه‌های زیرین به کار رفته در مبدل شده و در نتیجه خرابی مبدل‌ها را در بخش زیرکار لانه را به دنبال دارد. در درجه حرارت ثابت حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد قابلیت یک مبدل نو در مورد منوکسیدکربن بین ۶۸٪ تا ۹۹٪ و برای هیدروکربن‌ها ۹۵٪ است. در درجه حرارت خیلی پائین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد مبدل‌ها قابلیت خود را از دست می‌دهند. به درجه حرارتی که مبدل‌ها به قابلیت و کارایی ۵۰٪ خود می‌رسند اصطلاحاً درجه حرارت عطف و یا شاخص اطلاق می‌شود [۲].



شکل ۲-۱- مقایسه زیرکار فلزی و سرامیکی در مبدل‌های کاتالیستی.

۱- ۳- ۲- پوشش

از آنجائیکه سطح مونولیت سرامیکی یا فلزی بسیار پایین است، باید دیواره‌های آن توسط یک ماده‌ها سطح ویژه بالا پوشش داده شود. پوشش یا واش کوت به عنوان حامل مواد کاتالیستی برای توزیع مواد بر روی سطوح استفاده می‌شود. موادی نظیر اکسید آلومینیم، اکسید تیتانیم، اکسید سیلیسیم با ترکیبی از سیلیکا و آلومینا در سطح مبدل به کار می‌روند. این مواد دارای سطوح ناهموار و نامنظم است تا سطح تماس کاتالیست با سیال را افزایش دهد. وظیفه دیگر این پوشش، جلوگیری از اکسید شدن زیرلایه و افزایش قابلیت ذخیره

^۱ Wash Coat



اکسیژن به منظور بهبود سرعت انجام واکنش است. شماری از ترکیبات معمول که در ترکیب پوشش بکار می‌رود عبارتست از:

- آلومینا که به عنوان بستر با سطح تماس بالا عمل می‌کند،

- اکسیدهای مخلوط $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ که اساساً به عنوان تقویت‌کننده‌های ذخیره‌سازی اکسیژن اضافه می‌شوند،

- اکسیدهای باریم و لانتانیم به عنوان پایدار کننده‌های سطح تماس آلومینا [۵].

۱- ۳- ۳ - کاتالیست

کاتالیست معمولاً یک فلز گران قیمت است. پلاتین یکی از فعال‌ترین کاتالیست‌هایی است که کاربرد گسترده‌ای دارد. در عین حال این فلز برای هر کاربردی مناسب نیست زیرا واکنش‌های ناخواسته اضافی و هزینه بالایی در پی دارد. پالادیم و رودیم نیز دو کاتالیست گران‌بها محسوب می‌شوند. سریم، آهن، منگنز و نیکل نیز به عنوان کاتالیست کاربرد دارند اما هر یک از این فلزات نیز محدودیت‌هایی خود را دارند. این مواد با قرار گرفتن بر روی سطح زیرکار، وظیفه انجام و تسریع واکنش‌های شیمیایی تبدیل آلاینده‌ها را بر عهده دارند [۵].

۱- ۳- ۴ - پوسته

محفظه فلزی در برگیرنده اجزای فوق‌الذکر، پوسته^۲ نامیده می‌شود که ترکیبی از آلیاژهای مختلف با ویژگی‌هایی از قبیل تحمل دمای محفظه احتراق، عدم واکنش با مواد پوشش یا گازهای خروجی از اگزوز، مقاومت به خوردگی و... می‌باشد [۲].

همانطور که اشاره شد، مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی نسبت به کاتالیست‌های پایه سرامیکی گران‌تر هستند ولی نسبت به مبدل‌های کاتالیستی پایه سرامیکی دارای مزایایی هستند که به همین دلیل در برخی از خودروهای دیزلی و گران قیمت از آن‌ها استفاده می‌شود. مهمترین مزایای زیرکارهای فلزی نسبت به سرامیکی عبارتند از:

- زمان کمتر رسیدن به نقطه شروع واکنش

- ریسک پائین‌تر فوق گرمایش

^۱ Catalyst

^۲ Can

- فشار برگشتی کمتر : فشار برگشتی عبارت است، فشار ناشی از جریان گازهای خروجی موتور که به هر دلیلی مانند استفاده از صدا خفه‌کن یا مبدل کاتالیستی در سیستم از آگزوز خارج نشده است. فشار برگشتی بالا منجر به ایجاد اختلال در عملکرد موتور خواهد شد.
 - سطح موثر بیشتر
 - ظرفیت کاتالیستی بالاتر
 - انعطاف بالاتر در نوع طراحی و ابعاد کوچک‌تر
 - دیواره‌های نازک
 - استحکام مکانیکی بالاتر
 - مقاومت به شوک حرارتی بالاتر
- در شکل ۱-۳ نمونه‌هایی از مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی نشان داده شده است. مشخصات فنی یک مبدل کاتالیستی پایه فلزی نیز در جدول ۱-۱ آورده شده است.



شکل ۱-۳- تصویری از نمونه‌های مبدل کاتالیستی پایه فلزی.



جدول ۱-۱- مشخصات فنی مبدل کاتالیستی پایه فلزی تولید شرکت داینکس

Substrate	
Shape	RACE TRACK
Cross dimension	75 * 95 mm
Length	120 mm
Total volume	0.710 dm ³
Cell density	500 ± 10% cpsi ^۱
Total surface area	3.08 m ²
Wight, uncoated	690 ± 10% g
Foil	
Grade	1.4767
Thickness	0.05 mm
Washcoat	
Grade	DFI-EURO-4
Basic weight	45 ± 10% g/m ²
Precious metals	
Precious metals	Pd:Rh
Ratio	16:1
Loading, NOMINAL	2.83 g/dm ²
Loading, MIN	2.63 g/dm ²
Total amount	2.006 g
Weight	
Total unit weight	740 ± 10% g

۱-۴- مراحل تولید مبدل کاتالیستی پایه فلزی

به طور کلی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی شامل مراحل ذیل می‌گردد:

۱- تولید زیرکار:

- ساخت یا تهیه ورق نازک فولاد ضدزنگ مقاوم به حرارت

- شکل‌دهی ورق نازک:

- کرکره‌ای کردن

- رول کردن

^۱ Cpsi: cells per square inch



۲- پوشش‌دهی و نشان‌دادن کاتالیست با یک ماده سرامیکی (Wash Coat) بر روی ورق نازک کرکره‌ای

- آنیل ورق نازک کرکره‌ای

- تولید پوشش سرامیکی و نشان‌دادن آن بر روی ورق نازک کرکره‌ای

- نشان‌دادن کاتالیست بر روی پوشش

۳- قراردادن تجهیز درون یک پوسته

۴- انجام آزمون‌های عملکردی

در مرحله اول برای تولید زیرکار، از ورق نازک فولاد ضد زنگ مقاومت به حرارت استفاده خواهد شد. بنابراین تولید یا تهیه ورق مورد نظر اولین گام در این مرحله می‌باشد. در خصوص این ورق‌ها و امکان‌سنجی تولید آن‌ها توضیحات کاملی در بخش ۲-۶ این گزارش آمده است. گام بعدی از این مرحله، شکل‌دهی شامل کرکره‌ای کردن ورق و رول کردن آن می‌باشد. در مرحله دوم یعنی پوشش‌دهی و نشان‌دادن کاتالیست با یک ماده سرامیکی بر روی ورق نازک کرکره‌ای در ابتدا به منظور رسیدن به سطح متخلخل برای چسبندگی بهتر پوشش، ورق‌ها آنیل خواهند شد. در گام بعدی از این مرحله، پوشش سرامیکی (به طور معمول اکسید آلومینیوم) بر سطح ورق نشانده خواهد شد. گام آخر این مرحله نیز، نشان‌دادن فلزات گران‌بهای همچون پلاتین، پالادیوم و رودیم به عنوان کاتالیست بر روی پوشش می‌باشد. در آخر به منظور قرارگیری در سیستم آگروز خودرو، مونولیت تولید شده پس از واش کوت درون یک بستر لوله مانند فلزی مقاوم به اکسیداسیون در دمای بالا قرار می‌گیرد. در نهایت، آزمایش‌های عملکردی شامل پایداری در خودرو، مصرف سوخت خودرو مجهز به مبدل کاتالیستی و اندازه‌گیری آلاینده‌های خروجی از خودرو انجام خواهد شد.

با عنایت به مذاکرات انجام شده و تایید مدیرکل محترم دفتر تخصصی فنی مهندسی و علوم پایه، در این فاز از انجام پروژه دستیابی به دانش فنی شکل‌دهی ورق مطابق با مشخصات دریافتی از شرکت زامیاد مد نظر می‌باشد. پس از اطمینان از دستیابی به این مرحله و تولید مونولیت خام، در فاز بعدی (طرح جدید) مرحله پوشش‌دهی (واش کوت) قابل انجام خواهد بود. با توجه به اینکه ورق تهیه شده در این فاز پروژه مطابق استاندارد و مشابه با نمونه دریافتی از شرکت زامیاد است، طبق دستورالعمل‌های موجود قابلیت انجام واش کوت بر روی آن و استفاده به عنوان مبدل کاتالیستی پایه فلزی را دارا می‌باشد.



سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

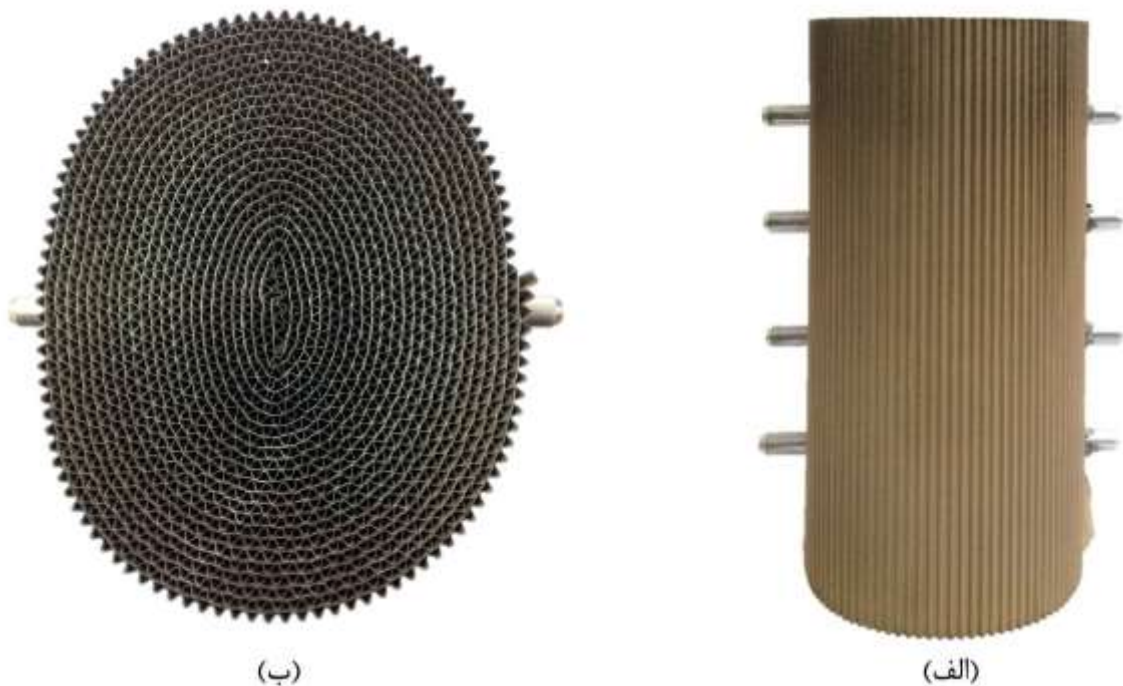
عنوان طرح: دستیابی به دانش فنی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی

فصل دوم:

مروری بر اقدامات انجام شده

۱-۲- تهیه نمونه مرجع مبدل کاتالیستی فلزی

در مرحله اول یک مبدل کاتالیستی فلزی نو از شرکت زامیاد به عنوان نمونه مرجع دریافت شد که تصویر آن در شکل ۱-۲ قابل مشاهده است. این مبدل کاتالیستی ساخت شرکت داینکس^۱ بوده و در وانت تک‌سوز یورو ۴ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است این مبدل و تمام مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی مورد استفاده در کشور، وارداتی هستند. نقشه فنی این نمونه و ابعاد آن در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. همچنین دو نمونه مبدل کاتالیستی کارکرده که درون سیستم اگزوز خودرو قرار دارد نیز از شرکت زامیاد دریافت شد که تصاویر آن‌ها در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است. موقعیت قرارگیری مبدل کاتالیستی فلزی درون سیستم اگزوز نیز در تصویر ۲-۳ برای هر دو نمونه کارکرده دریافتی نیز مشخص شده است. در مرحله بعد نیاز است با برش پوسته، مبدل کاتالیستی از درون اگزوز برای بررسی‌های بیشتر خارج شود.



شکل ۱-۲- تصاویر نمونه مرجع مبدل کاتالیستی فلزی دریافتی از شرکت زامیاد.

^۱ Dinex

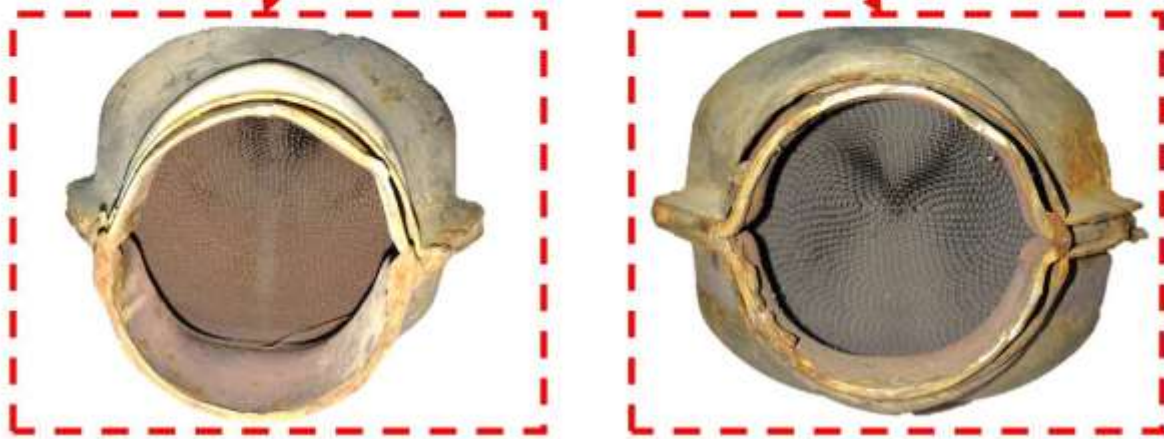


عنوان طرح: دستیابی به دانش فنی تولید مبدل های کاتالیستی پایه فلزی

سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی



شکل ۲-۲- نقشه فنی نمونه مرجع دریافت شده از شرکت زامیاد.



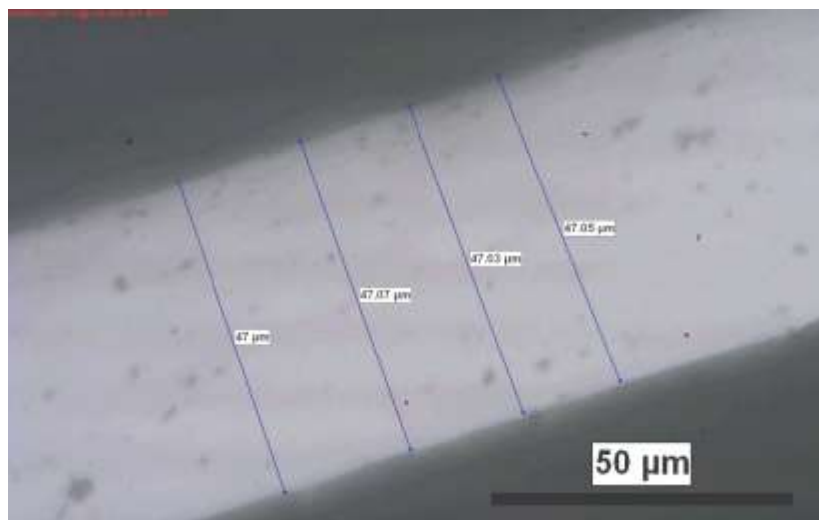
شکل ۳-۲- تصویر نمونه‌های کارکرده دریافتی از شرکت زامیاد، موقعیت مبدل کاتالیستی در درون سیستم آگزوز نیز برای هر نمونه مشخص شده است.

۲-۲ - مهندسی معکوس نمونه مرجع و استخراج مشخصات آن

پس از دریافت نمونه مرجع، مهندسی معکوس و استخراج برخی مشخصات مهم آن انجام شد که نتایج آن در این بخش گزارش خواهد شد. مرحله اول روش مهندسی معکوس که شامل تجزیه و تحلیل عملکردی/اقتصادی است، پیش از آغاز کار انجام شده است. در این مرحله اطلاعات موجود در خصوص مبدل‌های کاتالیستی و پروسه تولید آن جمع‌آوری و ارزیابی شده است و هدف از انجام این طرح به طور خاص مشخص شده است. در مرحله بعدی مهندسی معکوس، قطعات دریافتی از شرکت زامیاد دمونتاز و اجزای مختلف مبدل کاتالیستی پایه فلزی (مانند ورق کرکره‌ای، پین‌ها و ...) شناسایی شد. در مهم‌ترین مرحله از فرآیند مهندسی معکوس در کنار آنالیزهای ابعادی، آنالیز مواد به کمک روش‌هایی همچون متالوگرافی، XRF، EDS و ... انجام که نتایج حاصل در ادامه این بخش آورده خواهد شد. سپس با توجه به نتایج حاصل، فرآیند تولید مبدل مشخص خواهد شد. در ادامه برنامه‌ریزی‌های لازم برای تولید انجام و فرآیند تولید آغاز خواهد شد. در آخر نیز تمام مستندات مربوط به کل فرآیند تهیه و گزارش می‌شود.

۲-۲-۱ - تعیین ضخامت و جنس ورق

قسمتی از ورق نمونه مرجع جهت تعیین ضخامت آن آماده‌سازی شد و از آن تصویر میکروسکوپی مناسب تهیه شد. شکل ۲-۴ نتیجه اندازه‌گیری ضخامت به این روش را برای یک تصویر نشان می‌دهد. طبق این شکل ضخامت ورق ۴۷/۰۳ میکرومتر حاصل از ۴ اندازه‌گیری بر روی یک تصویر می‌باشد. ضخامت ورق توسط آزمایشگاه مواد و متالورژی پارک علم و فناوری خراسان نیز اندازه‌گیری و حدود ۵۰ میکرومتر گزارش شده است. تصویر گواهی آزمون ضخامت سنجی توسط این مجموعه در تصویر ۲-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۴ - اندازه ضخامت ورق در نمونه مرجع.



شماره: ۹۹۰۵۸۵TK-۰۱
تاریخ: ۹۹/۰۲/۲۴

آزمایشگاه مواد و متالورژی

پارک علم و فناوری خراسان

گواهی آزمون ضخامت سنجی

درخواست کننده: آقای علی محمدی
مشخصات نمونه: فولاد ساده
استاندارد روش: -

شماره درخواست: -
تاریخ درخواست: ۹۹/۰۲/۲۴

کد نمونه: ۱-47-281

توضیحات:
ضخامت ورق فوق حدود ۵۰ میکرون می باشد.

دستگاه: میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل BX60

نام و امضاء آزمون کننده: حسن احمدی
نام و امضاء مدیر فنی: محمد باقریان
نام و امضاء مدیر آزمایشگاه: علیرضا حبیب علم مهر آزمایشگاه

✓ نتایج آزمون فقط به اقلام آزمون شده مرتبط است.
✓ گزارش آزمایش بدون مهر برجسته آزمایشگاه فاقد اعتبار است.
✓ هر گونه نسخه برداری از این گزارش باید بطور کامل از تمام صفحات باشد.

دفتر مرکزی خدمات فنی جهاد: بلوار سجاد، خیابان امین، نبش لهن ۲، پلاک ۲۸
آزمایشگاه: مشهد، کيلومتر ۱۲ بزرگراه مشهد-خوجان مقابل کارخانه شیر پاکه
تلفن: ۰۵۱-۲۵۰۲۵۱۱ - فاکس: ۰۵۱-۲۵۴۲۵۶۱۳ - تلفن: ۰۵۱-۲۶۰۸۸۲۱۰

F140

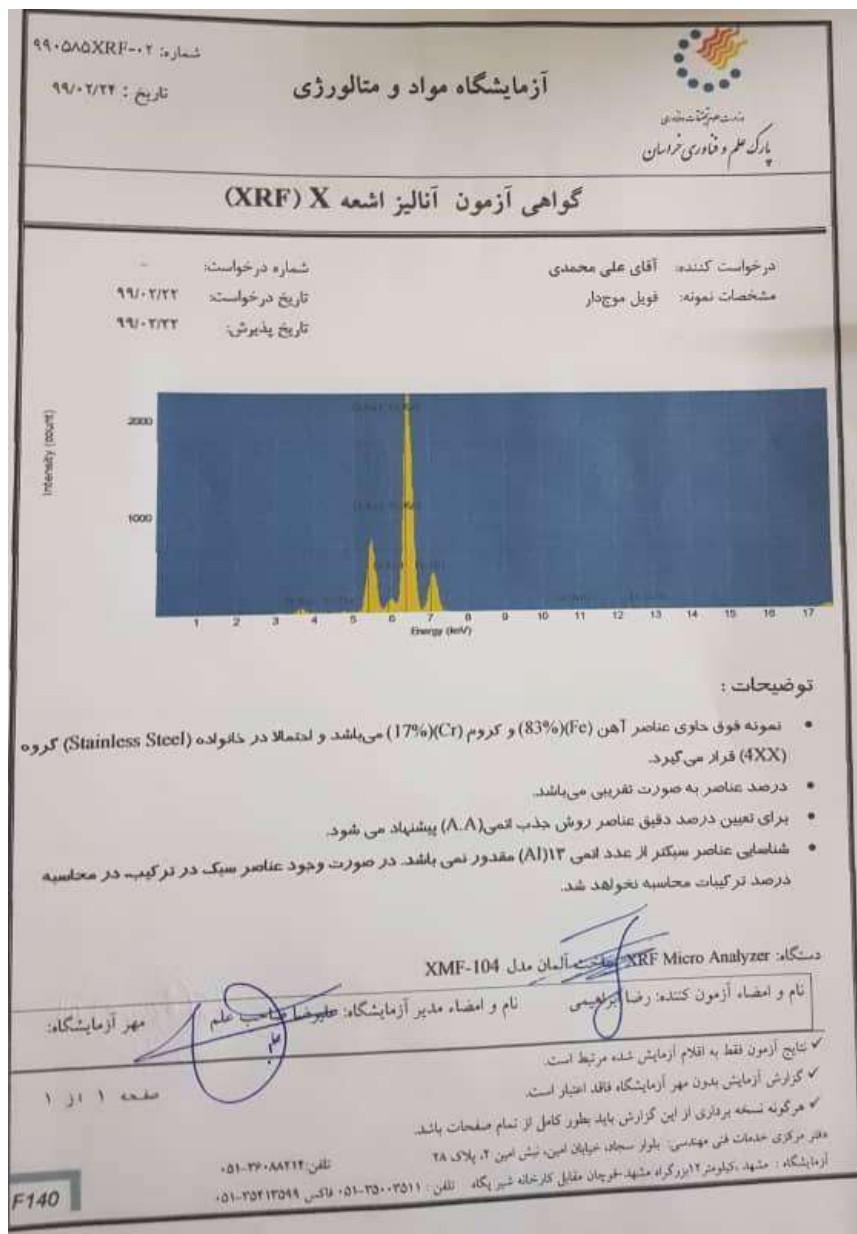
شکل ۲-۵- تصویر گواهی ضخامت سنجی ورق نمونه مرجع توسط آزمایشگاه مواد و متالورژی پارک علم و فناوری خراسان.

به منظور تعیین جنس ورق نمونه مرجع، از آزمون XRF استفاده شد که گواهی این آزمون در تصویر ۲-۶ آورده شده است. بر طبق نتایج این آزمون، عناصر اصلی در ترکیب این ورق آهن و کروم می باشد و به احتمال زیاد از خانواده فولادهای ضد زنگ (گروه 4XX) است.

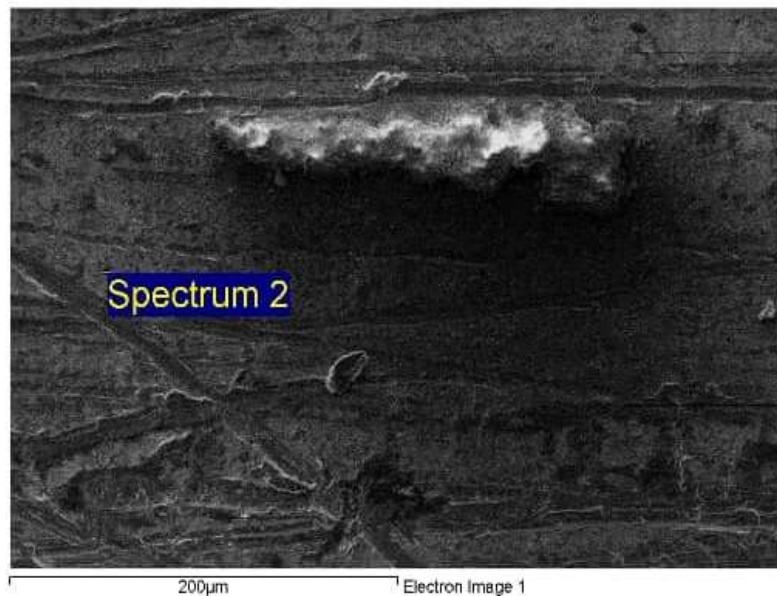
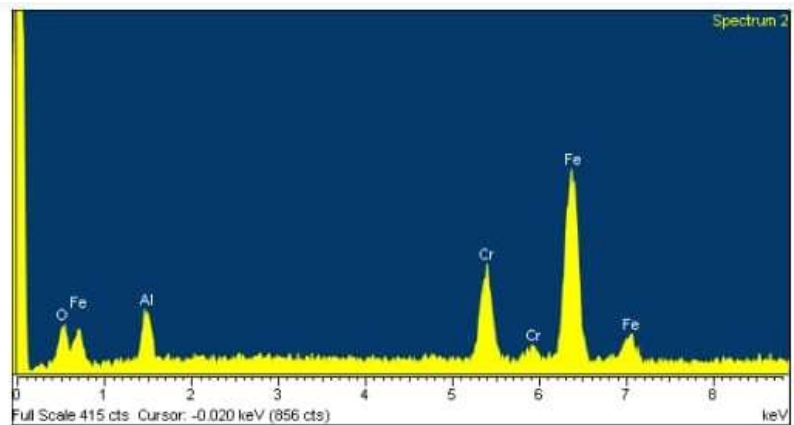
همچنین طبق آنالیز EDS انجام شده، عناصر اصلی در ترکیب شیمیایی ورق آهن، کروم و آلومینیوم می باشد که با نتیجه آزمون XRF همخوانی دارد. شکل ۲-۷ تصویر SEM ورق و نتیجه آنالیز EDS انجام شده را نشان می دهد. بنابراین با توجه به نتایج آزمون های انجام شده و مطالعات صورت گرفته، ورق



استفاده شده در نمونه مرجع از نوع ورق فولادی ضد زنگ با ضخامت ۵۰ میکرومتر است. لازم به ذکر است، با توجه به ضخامت کم ورق استفاده شده انجام آزمون کوانتومتری و دستیابی به ترکیب شیمیایی آن از این طریق ممکن نمی‌باشد. در صورت نیاز امکان انجام کوانتومتری پس از برداشتن پوشش ورق و به روش ذوب مجدد تحت خلا وجود دارد که مستلزم صرف هزینه و زمان می‌باشد. البته با توجه به نتایج حاصل از XRF، EDS و متالوگرافی (که در ادامه بیان خواهد شد) و همچنین مستندات دریافتی از شرکت زامیاد، نوع ورق مورد استفاده در نمونه مرجع فولاد ضدزنگ مقاوم به حرارت با گرید ۱/۴۷۲۵ می‌باشد.



شکل ۶-۲- گواهی آزمون XRF مربوط به ورق نمونه مرجع.

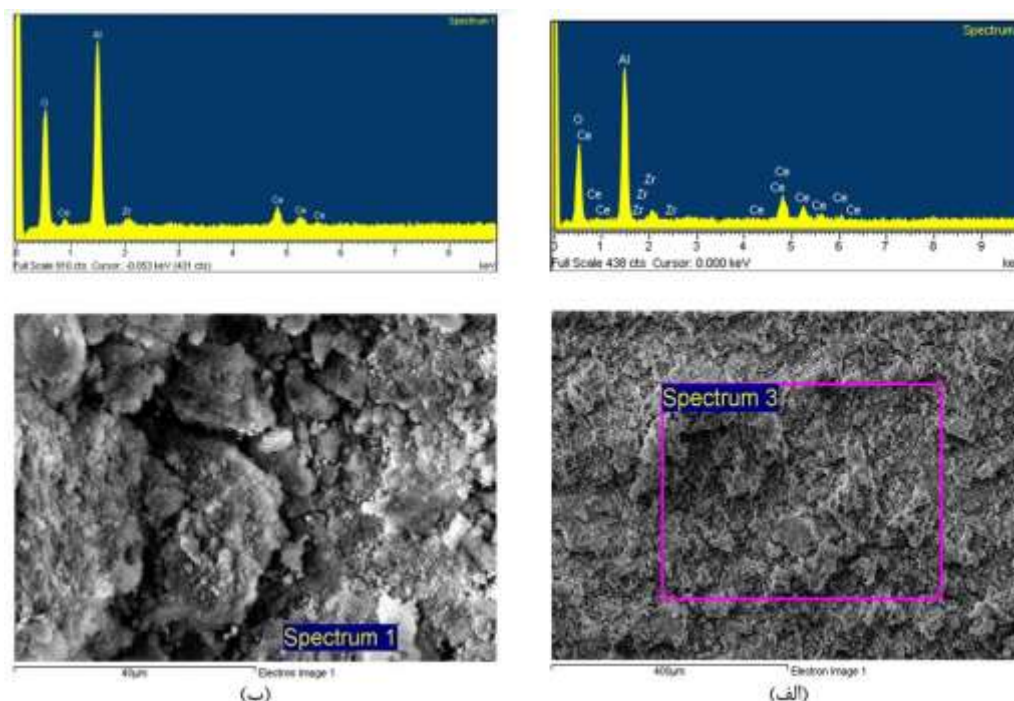


شکل ۲-۷- تصویر SEM و نتیجه آنالیز EDS انجام شده بر روی ورق نمونه مرجع.

۲-۲-۲- تعیین جنس پوشش و ذرات کاتالیستی

به منظور تعیین جنس پوشش و ذرات کاتالیستی از آنالیز EDS و XRF استفاده شده است. شکل ۲-۸ تصویر SEM پوشش در دو بزرگنمایی مختلف و نتیجه حاصل از آنالیز EDS پوشش را نشان می‌دهد. با توجه به فراوانی عنصر آلومینوم و سپس اکسیژن در طیف EDS حاصل، پوشش استفاده شده از جنس Al_2O_3 می‌باشد. پیک‌های مربوط به عناصر Ce (سریم) و Zr (زیرکونیوم) در طیف EDS مشاهده شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته، اکسیدهای مخلوط سریم و زیرکونیوم CeO_2-ZrO_2 به منظور بهبود عملکرد کاتالیزورها در پوشش به همراه Al_2O_3 بکار خواهند رفت. هیچ پیکی مربوط به ذرات کاتالیستی در

نتایج مشاهده نشده است. دلیل این امر این است که مقادیر ذرات کاتالیستی مانند Pd و Rh اندک و کمتر از حد تشخیص توسط این روش می‌باشد.



شکل ۲-۸- تصاویر SEM پوشش در دو بزرگنمایی به همراه طیف حاصل از آنالیز EDS بر روی نمونه مرجع.

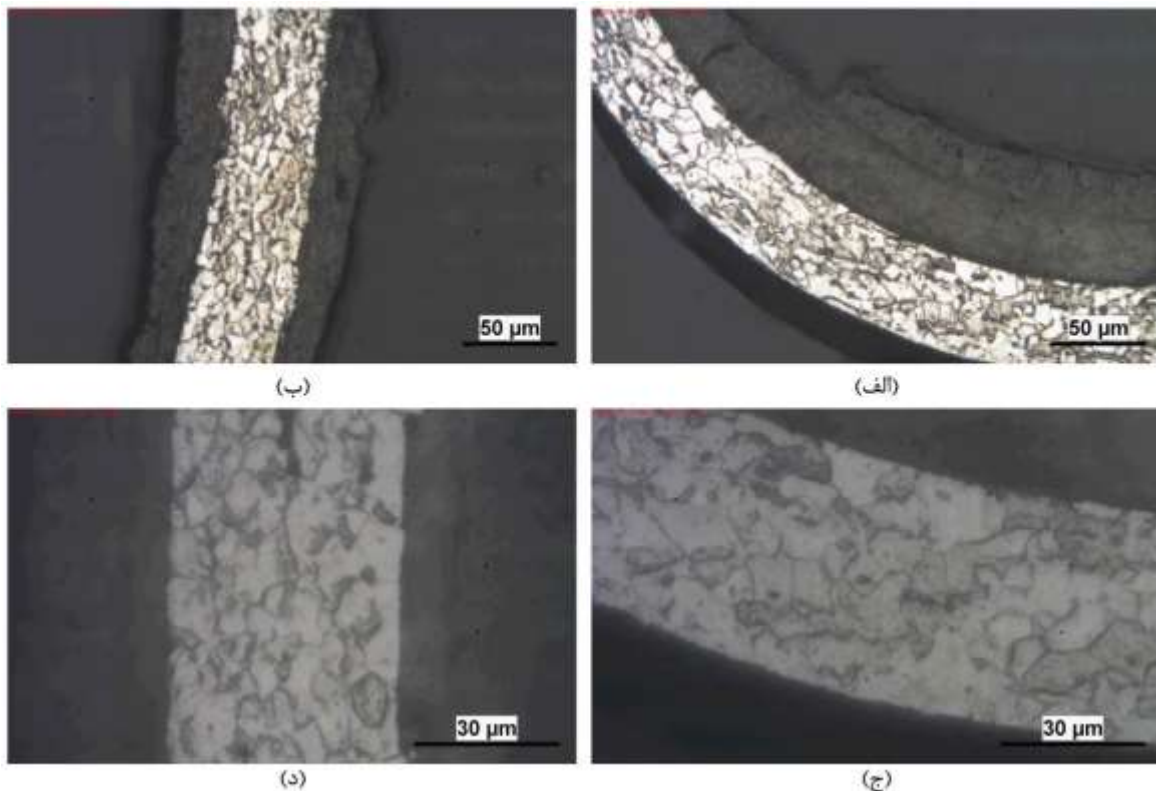
به منظور بررسی بیشتر پوشش و تعیین ترکیبات تشکیل‌دهنده آن، آنالیز XRF نیز بر روی آن انجام شد که نتیجه آن در جدول ۱-۲ آورده شده است. لازم به ذکر است تنها ترکیبات مهم و دارای درصد قابل توجه در این جدول آورده شده است. طبق این نتایج، عمده پوشش را ترکیب Al_2O_3 تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، همانطور که در نتایج EDS هم مشاهده شد، اکسیدهای مخلوط سرب و زیرکونیم CeO_2-ZrO_2 نیز در پوشش حضور دارند که موجب عملکرد بهتر کاتالیزورها خواهند شد. اکسیدهای باریوم و لانتانیم نیز که در نتایج آزمون XRF مشاهده شدند، به عنوان پایدارکننده سطح تماس آلومینا در پوشش حضور دارند. همچنین با توجه به حضور اکسید پالادیوم (PdO) و اکسید رودیوم (Rh_2O_3) در نتایج XRF و درصد این ترکیبات، می‌توان ادعا داشت که عناصر پالادیوم و رودیوم به عنوان کاتالیزور در بستر پوشش قرار دارند. شایان ذکر است که گزارش نتایج XRF در حالت اکسیدی به دلیل کالیبراسیون دستگاه XRF در این حالت می‌باشد.

جدول ۱-۲- نتایج آزمون XRF پوشش نمونه مرجع (اعداد بر حسب درصد)

Al_2O_3	CeO_2	ZrO_2	PdO	La_2O_3	BaO	Rh_2O_3
42.1	33.3	16.0	2.1	1.9	0.4	0.1

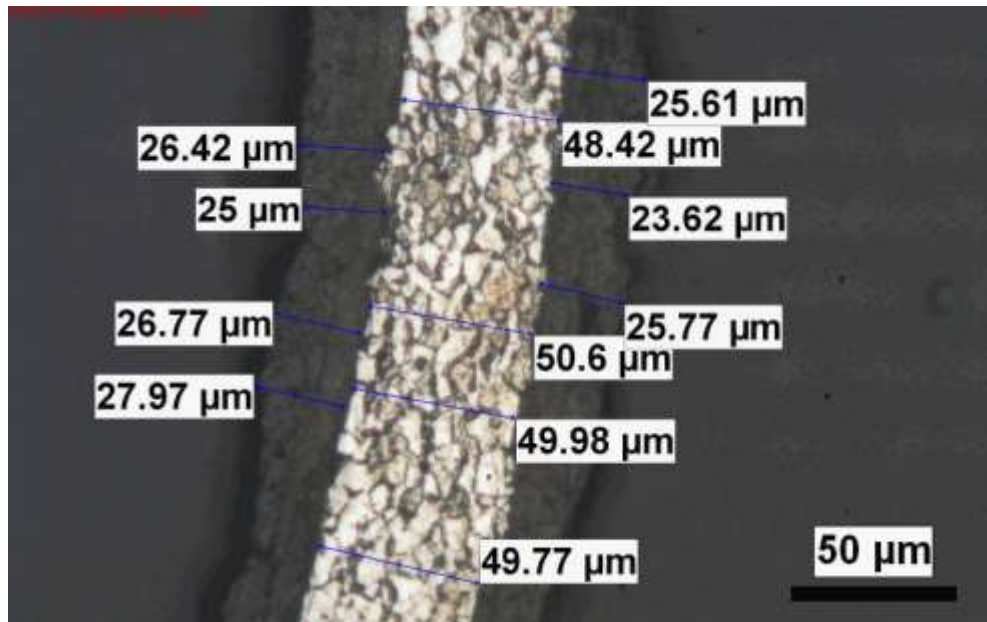
۲-۲-۳- بررسی ریزساختاری ورق

پس از نمونه‌سازی از ورق مرجع استفاده شده در مبدل کاتالیستی دریافتی، مراحل آماده‌سازی و متالوگرافی جهت تعیین ریزساختار آن انجام شد. تصویر ریزساختار از دو قسمت مختلف ورق که توسط میکروسکوپ نوری در دو بزرگنمایی مختلف تهیه شده است در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. تصویر متالوگرافی نشان می‌دهد که ریزساختار ورق فریت-پرلیت می‌باشد. پس از حکاکی به منظور مشاهده ریزساختار ورق، مرز میان ورق و پوشش به طور واضح‌تر قابل شناسایی بود. بنابراین، ضخامت ورق و پوشش روی آن در این مرحله نیز به کمک تصاویر میکروسکوپی اندازه‌گیری شد. شکل ۲-۱۰ نتیجه حاصل از این اندازه‌گیری را بر روی یک تصویر نشان می‌دهد. طبق این تصویر، ضخامت ورق بین ۴۸/۴۲ و ۵۰/۶۰ میکرومتر و ضخامت پوشش بین ۲۵ تا ۲۷/۹۷ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۲-۹- تصویر ریزساختار ورق فولادی نمونه مرجع، (الف) و (ب) در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، (ج) و (د) در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر.

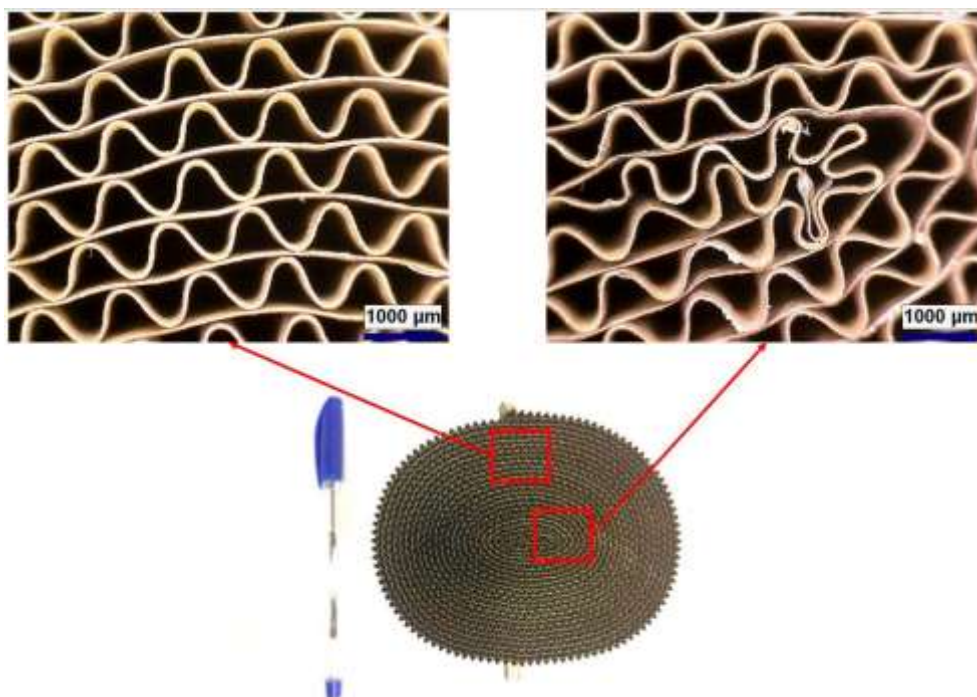
^۱ Etch



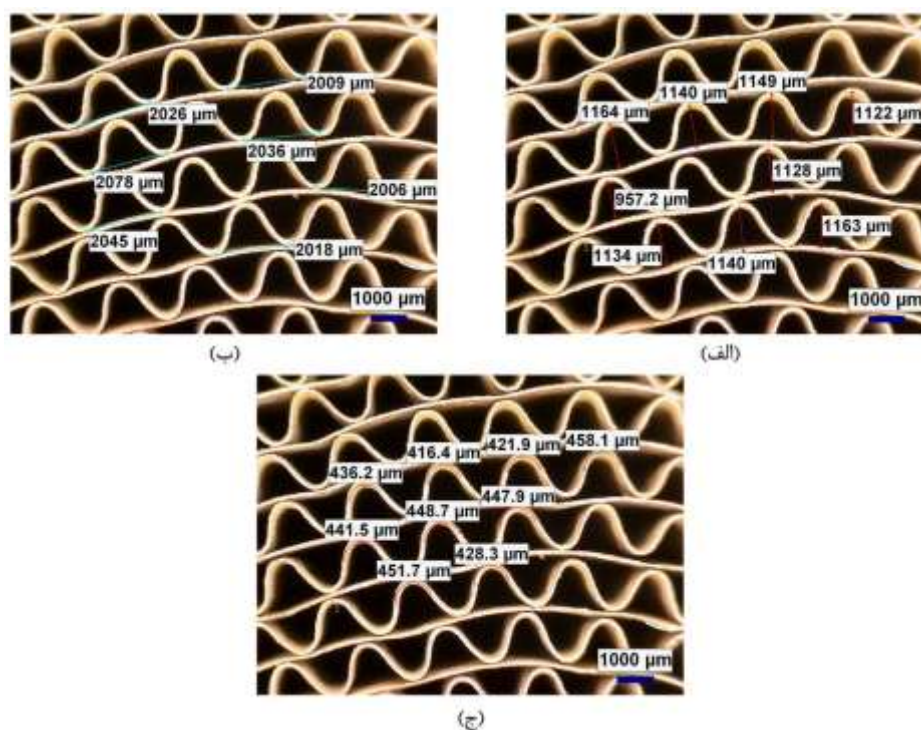
شکل ۲-۱۰- اندازه‌گیری ضخامت ورق و پوشش نمونه مرجع پس از حکاکی.

۲-۲-۴ - تعیین ابعاد هندسی مبدل، فرم و شکل کرکره‌های داخلی

ابعاد هندسی مبدل مطابق با نقشه ارسالی در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است. به منظور بررسی فرم و شکل کرکره‌های داخلی از نمونه مرجع ارسالی تصاویر میکروسکوپی تهیه شد که در شکل ۲-۱۱ مشاهده می‌شود. تصاویر به خوبی نشان می‌دهد که مبدل حاضر از تاباندن یا رول کردن دو ورق فلزی نازک که بر روی هم قرار گرفته‌اند، ساخته شده است. یک ورق به شکل کرکره‌ای است که بر روی یک ورق دیگر قرار گرفته است. با قرار گرفتن این دو ورق بر روی هم و تاباندن حول یک محور مشترک، ساختاری حاصل شده است که اولاً منافذی جهت عبور گازهای خروجی دارد، ثانیاً ضمن تامین بیشینه مساحت سطح که به منظور انجام واکنش‌های کاتالیستی بر روی گازهای خروجی مورد نیاز است، استحکام مناسبی نیز خواهد داشت. پس از تهیه تصاویر میکروسکوپی از مبدل کاتالیستی، پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای مرجع همانطور که در شکل ۲-۱۲ آورده شده است، توسط نرم‌افزارهای پردازش تصویر اندازه‌گیری شده است. نتیجه حاصل از اندازه‌گیری نشان می‌دهد که دامنه کرکره‌ها بین $957 \mu m$ تا $1164 \mu m$ (میانگین $= 1060/5 \mu m$)، طول موج آن‌ها بین $2006 \mu m$ تا $2078 \mu m$ (میانگین $= 2042 \mu m$) و شعاع راس بین $415 \mu m$ تا $458 \mu m$ (میانگین $= 436/5 \mu m$) می‌باشد.

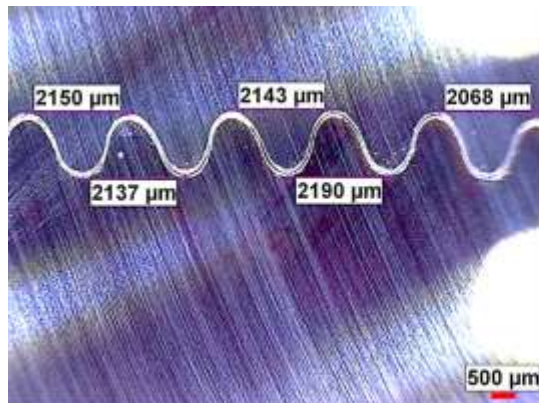


شکل ۲-۱۱- تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از دو قسمت مختلف مبدل کاتالیستی مرجع.

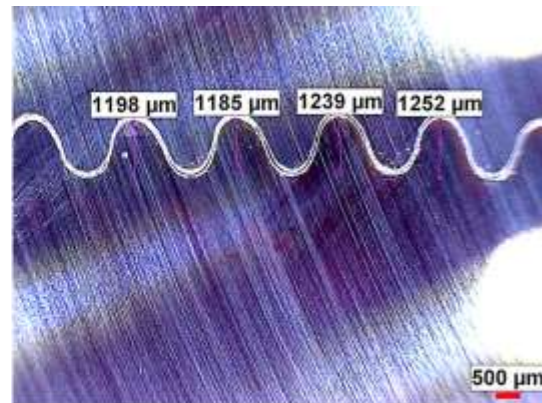


شکل ۲-۱۲- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق نمونه مرجع (در حالت تابانیده شده)، (الف دامنه، ب) طول موج و ج) شعاع راس کرکره‌ها.

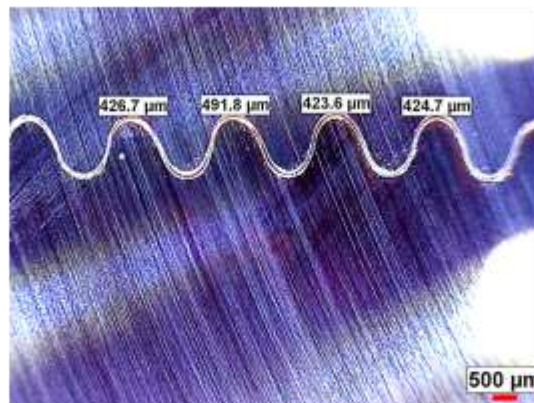
در ادامه یک قسمت از ورق کرکره‌ای نمونه مرجع باز و برش داده شد تا پس از قرارگیری در درون مانت و تهیه تصاویر میکروسکوپی پارامترهای فرم هندسی آن بدون تاثیر عملیات تابانیدن اندازه‌گیری شود. نتایج حاصل که در شکل ۲-۱۳ آورده شده است به منظور طراحی دستگاه فرم‌دهی ورق قابل استفاده خواهد بود. نتیجه حاصل از اندازه‌گیری نشان می‌دهد که دامنه کرکره‌ها بین $1185 \mu\text{m}$ تا $1252 \mu\text{m}$ (میانگین = $1218.5 \mu\text{m}$)، طول موج آن‌ها بین $2068 \mu\text{m}$ تا $2190 \mu\text{m}$ (میانگین = $2137.6 \mu\text{m}$)، و شعاع راس بین $423.6 \mu\text{m}$ تا $441.7 \mu\text{m}$ (میانگین = $431.7 \mu\text{m}$) می‌باشد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲-۱۳- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق نمونه مرجع (در حالت باز و مانت شده)، الف) دامنه، ب) طول موج و ج) شعاع راس کرکره‌ها.



۲-۳ - تهیه ورق نازک فولاد ضدزنگ مقاوم به حرارت

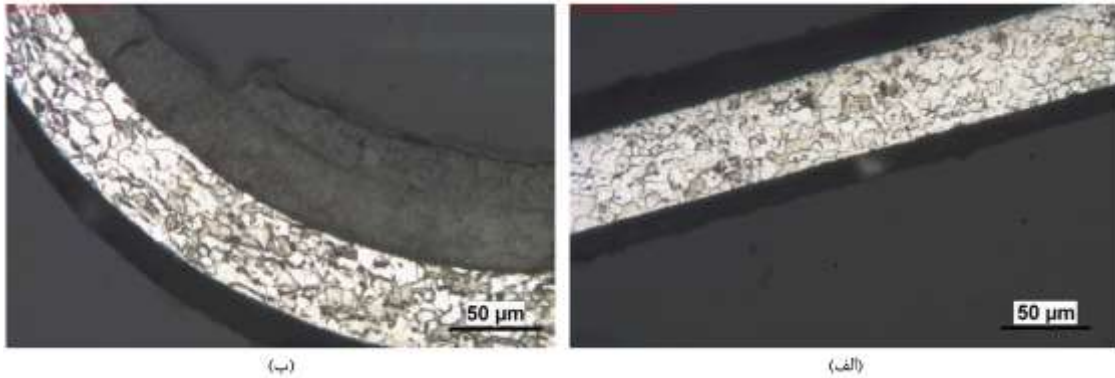
با توجه به نتایج حاصل از مهندسی معکوس نمونه مرجع، بررسی‌های مورد نیاز جهت تهیه و تامین ورق فولادی با مشخصات مدنظر و مطابق با نمونه مرجع انجام شد. متأسفانه با توجه ضخامت بسیار پایین این ورق‌ها (این ورق‌ها در دسته Ultra thin sheet metal قرار می‌گیرند) و استفاده‌های محدود و خاص آن‌ها، این ورق‌ها در ایران تولید نمی‌شوند. تولید این ورق‌ها با توجه به موارد گفته شده نیاز به طراحی و ساخت خط تولید جداگانه‌ای دارد. بنابراین، مقدار ده کیلوگرم ورق مورد نیاز از جنس فولاد ضد زنگ مقاوم به حرارت از یک شرکت چینی سفارش داده شد. برخی مشخصات ورق تهیه شده در جدول ۲-۲ آورده شده است. ضخامت این ورق همانطور که مورد نیاز بود، ۵۰ میکرومتر (۰/۰۵ mm) و عرض آن ۱۸ میلیمتر می‌باشد. با توجه به عرض ورق استفاده شده در مبدل کاتالیستی مرجع (۱۲ سانتیمتر)، پس از دریافت ورق و قبل از هر اقدامی جهت فرم‌دهی آن، عرض آن توسط برش به وسیله دستگاه وایرکات ۶ سانتیمتر کوتاه شد و به ۱۲ سانتیمتر رسید.

جدول ۲-۲- برخی مشخصات ورق فولادی تهیه شده

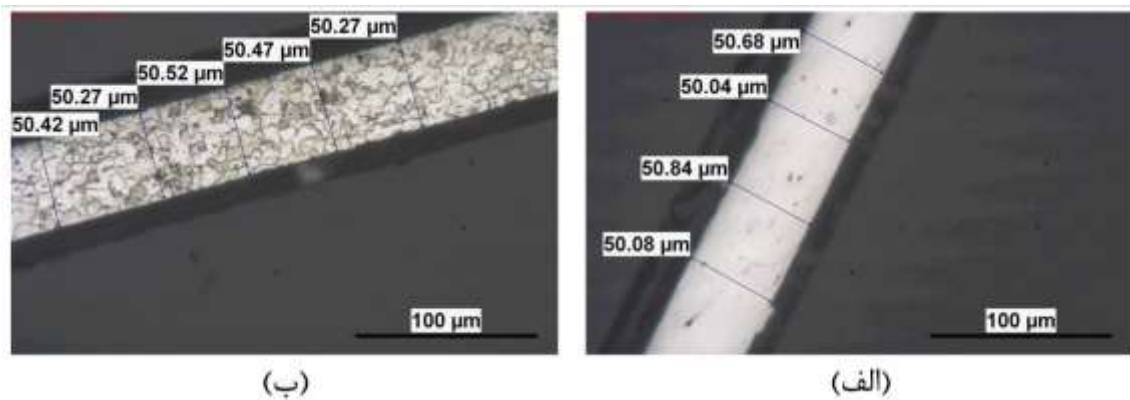
Grade	
Grade	1.4767 (CrA 20 5)
Thickness	0.05 mm
Chemical Composition (%)	
C	Max. 0.08
Cr	19-21
Al	4.5-5.25
Mn	Max. 0.5
Si	Max. 0.6
Zr	Max. 0.3
Fe	Balance

به منظور بررسی ریزساختار ورق خریداری شده، عملیات آماده‌سازی و متالگرافی بر روی یک نمونه از این ورق انجام شد. شکل ۲-۱۴ ریزساختار ورق خریداری شده را در کنار ریزساختار ورق نمونه مرجع نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲-۱۴ قابل مشاهده است، ریزساختار ورق شامل فازهای فریت و پرلیت می‌باشد. بنابراین فولاد خریداری شده آنیل شده و ریزساختار آن از جهت نوع و میزان فاز مطابق با ورق استفاده شده در نمونه مرجع می‌باشد. همچنین، ضخامت این ورق نیز با تهیه تصویر میکروسکوپی قبل از

حکاکی و بعد از آن اندازه‌گیری شد و نتیجه آن در شکل ۲-۱۵ آورده شده است. نتیجه نشان می‌دهد که ضخامت ورق مطابق با آنچه انتظار می‌رفت ۵۰ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۲-۱۴- تصویر ریزساختار الف) ورق خریداری شده، ب) ورق نمونه مرجع در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر.



شکل ۲-۱۵- نتیجه اندازه‌گیری ضخامت بر روی تصاویر میکروسکوپی ورق خریداری شده، الف) قبل از حکاکی، ب) بعد از حکاکی.

۲-۴ - طراحی و ساخت دستگاه فرم‌دهی ورق

در این مرحله، پس از بررسی‌های صورت گرفته بر روی نمونه مرجع به منظور آماده‌سازی ورق‌های فولادی به شکل و هندسه مورد نظر، نیاز به فرم‌دهی ورق توسط دستگاه‌های مربوطه می‌باشد. اقدامات اولیه به منظور نوع و میزان فرم‌دهی ورق توسط یک دستگاه شکل‌دهی که تصویر آن در شکل ۱۶-۲ قابل مشاهده است انجام شد. نتایج نشان داد که دستگاه فرم‌دهی خاصی با توجه به پارامترهای هندسی ورق، مورد نیاز است. پس از بررسی‌های اولیه نظر به اینکه دستگاه مورد نیاز جهت فرم‌دهی ورق‌ها و رسیدن به هندسه مورد نظر در دسترس نبود، اقدامات لازم جهت طراحی و ساخت دستگاه فرم‌دهی ورق (شامل مرحله کرک‌های کردن و رول کردن) آغاز شد.



شکل ۲-۱۶- دستگاه شکل‌دهی اولیه.

در اولین گام پس از مطالعه، بررسی و خرید تجهیزات مورد نیاز یک نمونه اولیه از دستگاه مورد نیاز به منظور فرم‌دهی ورق و تولید ورق کرکره‌ای طراحی و ساخته شد. شکل ۲-۱۷ بخشی از تجهیزات خریداری شده بدین منظور شامل میکروسوئیچ‌ها، موتور و قالب‌ها را نشان می‌دهد. تصویر دستگاه اولیه آماده شده نیز در شکل ۲-۱۷ قابل مشاهده است. توسط این دستگاه و با توجه به شکل هندسی مورد نیاز، مرحله کرکره‌ای کردن ورق انجام شد و پارامترهای آن مورد بررسی قرار گرفت.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲-۱۷- برخی از قطعات و تجهیزات تهیه شده برای ساخت دستگاه شکل‌دهی، الف) قالب‌ها، ب) میکروسوئیچ‌ها و ج) موتور.



شکل ۲-۱۸- تصویری از دستگاه شکل‌دهی آزمایشی اولیه برای کرکره‌ای کردن ورق.

شکل ۲-۱۹ تصاویر دستگاه را پس از اصلاحات و آماده‌سازی مجدد نشان می‌دهد. پس از انجام اصلاحات مورد نیاز بر روی دستگاه فرم‌دهی، این دستگاه مجدد آماده و یک نمونه دیگر ورق کرکره‌ای شده توسط این دستگاه تولید شد. در این مرحله، کرکره‌ای کردن بر روی ورق با عرض ۱۲ سانتیمتر انجام شد. با توجه به اعوجاج‌های به وجود آمده ناشی از ضخامت کم ورق، اضافه کردن راهنما به دستگاه در دستور کار قرار گرفت.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲-۱۹- تصاویری از دستگاه فرم‌دهی طراحی و ساخته شده پس از اصلاحات اولیه.

پس از انجام اصلاحات و اضافه شدن راهنما به دستگاه فرم‌دهی، مجدد دستگاه راه اندازی شد. شکل ۲-۲۰ تصویر قسمت راهنماهای اضافه شده به دستگاه را نشان می‌دهد. با راهنمای استفاده شده، ورق از طرفین و از بالا (توسط نگهدارنده تفلونی از بالا مهار خواهد شد تا آسیبی مانند خش بر روی ورق ایجاد نشود) مهار خواهد شد. در این مرحله، دستگاه مجدد راه‌اندازی شد و یک نمونه از ورق با عرض ۱۲ سانتیمتر فرم‌دهی شد.



شکل ۲-۲۰- تصویر از قسمت راهنما که بر روی دستگاه نصب خواهد شد.

با تایید عملکرد دستگاه پس از اضافه شدن راهنماها، ادامه مراحل تکمیل ساخت دستگاه فرم‌دهی که شامل بخش‌هایی همچون رول بازکن، تابلوبرق، بدنه و شاسی، رنگ‌آمیزی و ... در دستور کار قرار گرفت. شکل ۲-۲۱ تصاویری از مراحل مختلف تکمیل ساخت دستگاه را نشان می‌دهد. شکل ۲-۲۲ نیز تصویر دستگاه پس از تکمیل ساخت را نشان می‌دهد.



سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

عنوان طرح: دستیابی به دانش فنی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی



شکل ۲-۲۱: تصاویری از مراحل تکمیل ساخت دستگاه فرم‌دهی ورق.



شکل ۲-۲۲: تصاویری از دستگاه فرم‌دهی پس از تکمیل مراحل ساخت.

این دستگاه همانطور که در شکل ۲-۲۳ قابل مشاهده است از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است عبارت است از:



- ۱- رول باز کن: رول ورق خام در این قسمت قرار می‌گیرد. با توجه به پیچ‌های تنظیم قرار گرفته بر روی آن امکان نصب رول‌هایی با حجم ورق متفاوت می‌باشد.
- ۲- مجموعه راهنما: این مجموعه همانطور که توضیح داده شد به منظور هدایت ورق به سمت غلطک‌های فرم‌دهی و اعمال نیروی فشاری مناسب به آن طراحی و ساخته شده است.
- ۳- غلطک‌های فرم‌دهی: با توجه به اینکه دو نوع فرم‌دهی ورق مورد نیاز بوده است، دو مجموعه غلطک آماده شده است که در کشل ۲-۲۴ قابل مشاهده است. هر کدام از مجموعه غلطک‌ها در قسمت تعبیه شده بر روی دستگاه قابل نصب است.
- ۴- مجموعه کنترل دستگاه: قابلیت تنظیم سرعت دستگاه با امکان نمایش سرعت آن بر روی پنل تعبیه شده و همچنین قابلیت تنظیم جهت حرکت غلطک‌های فرم‌دهی (چپ‌گرد و راست‌گرد) با استفاده از این مجموعه کنترل فراهم است.
- ۵- تابلو برق دستگاه: مجهز به فیوز حافظ جان، دیمر بمنظور کنترل سرعت و جهت حرکت موتور



شکل ۲-۲۳: بخش‌های مختلف دستگاه فرم‌دهی طراحی و ساخته شده.



شکل ۲-۲۴: دو مجموعه غلطک فرم‌دهی طراحی و ساخته شده.

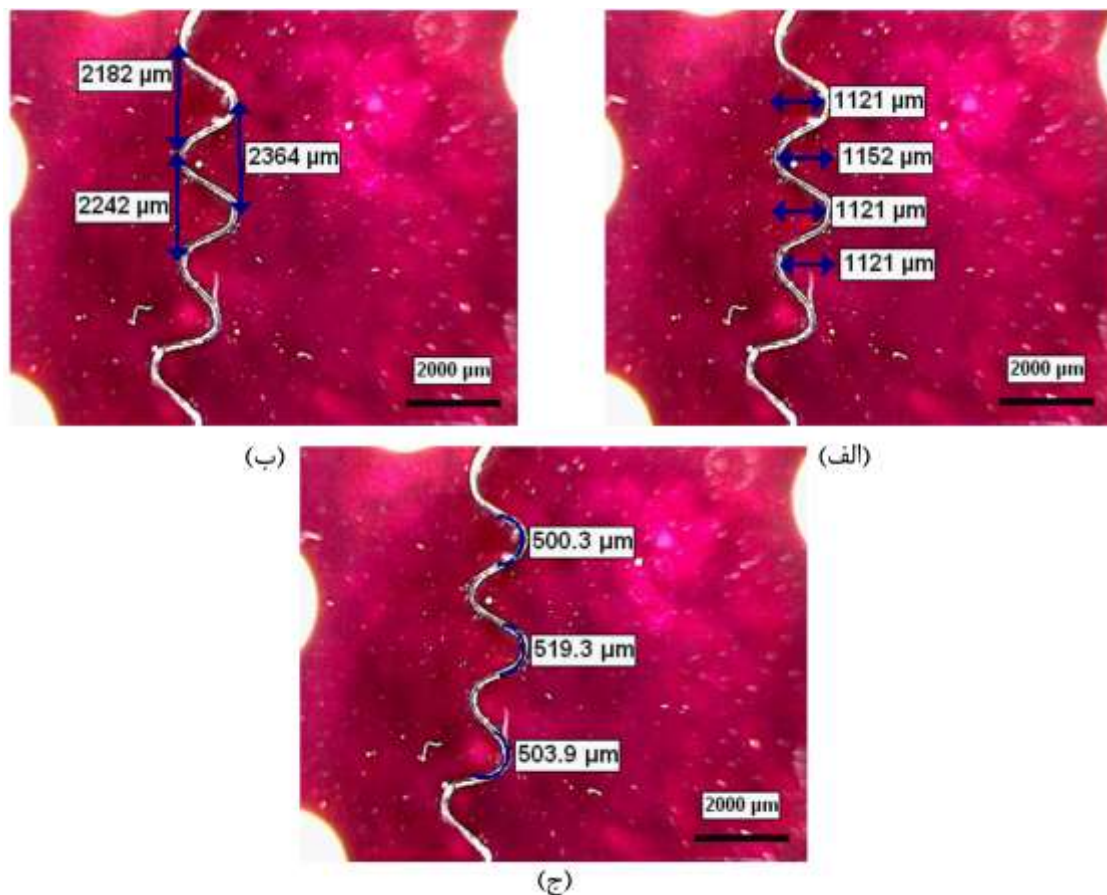
۲-۵ - بررسی پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده

۲-۵-۱ - ورق کرکره‌ای شده اولیه

پس از آماده شدن دستگاه فرم‌دهی اولیه، یک نمونه از ورق تهیه‌شده توسط این دستگاه به شکل کرکره‌ای فرم‌دهی شد (شکل ۲-۲۵). به منظور بررسی پارامترهای هندسی این ورق، قسمتی از آن درون مانت قرار گرفت و تصاویر میکروسکوپی مناسب از آن تهیه شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده در شکل ۲-۲۶ آورده شده است. بر طبق این نتایج، دامنه کرکره‌ها بین $1121 \mu\text{m}$ تا $1152 \mu\text{m}$ (میانگین $= 1182 \mu\text{m}$)، طول موج آن‌ها بین $2182 \mu\text{m}$ تا $2364 \mu\text{m}$ (میانگین $= 2273 \mu\text{m}$) و شعاع راس بین $50.3 \mu\text{m}$ تا $519.3 \mu\text{m}$ (میانگین $= 509.8 \mu\text{m}$) می‌باشد. البته این اندازه‌گیری‌ها قبل از تابانیدن ورق انجام شده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق نمونه مرجع در حالت مونتاژ شده و تابانیده شده انجام شده است، مقایسه نتایج کار چندان درستی نمی‌باشد. این اندازه‌گیری‌ها برای بررسی نتایج حاصل از فرم‌دهی ورق به شکل کرکره‌ای در مراحل مختلف و مقایسه آن‌ها انجام شده است. با این وجود تطابق خوبی میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده با ورق مرجع وجود دارد. در هر صورت به منظور بهبود شکل هندسی ورق کرکره‌ای تولیدی، پس از بررسی‌های بیشتر مواردی جهت اصلاح دستگاه فرم‌دهی مشخص شد و در دستور کار قرار گرفت.



شکل ۲-۲۵- ورق کرکره‌ای شده.



شکل ۲-۲۶- تصاویر میکروسکوپی ورق کرکره‌ای شده پس از قرارگیری در مانیت به همراه نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده اولیه، الف) دامنه، ب) طول موج و ج) شعاع راس کرکره‌ها.

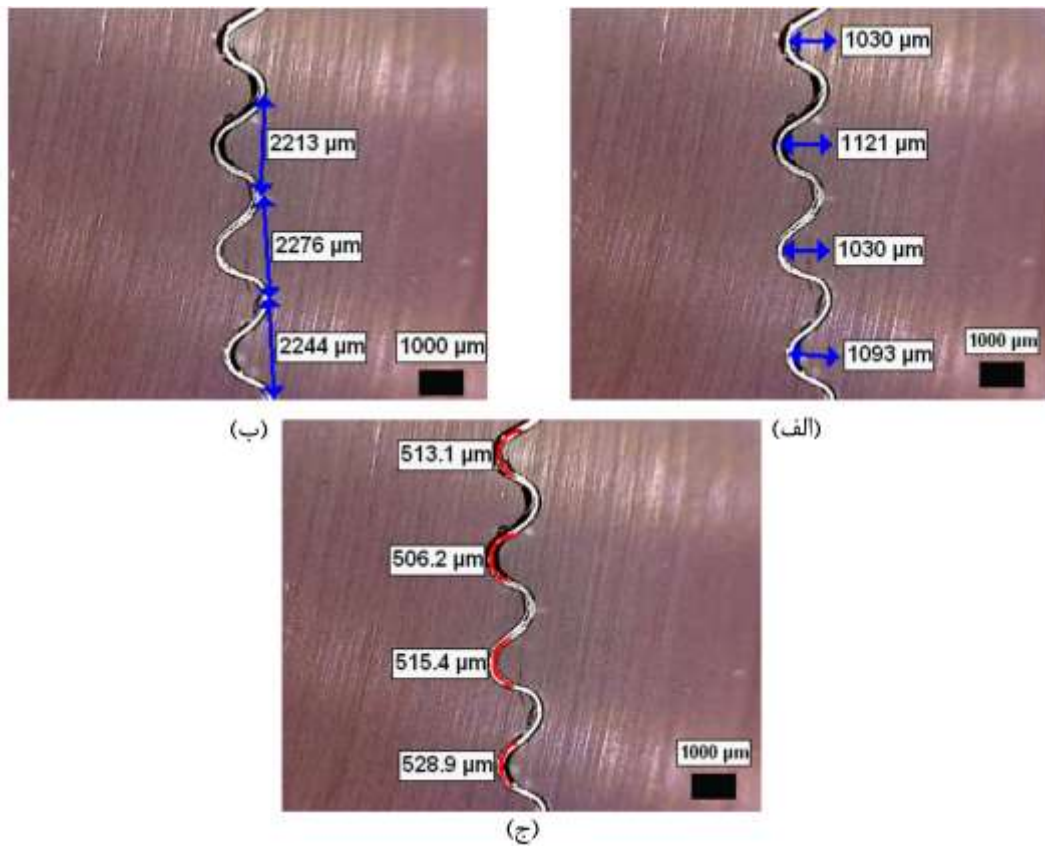
۲- ۵ - ۲- ورق کرکره‌ای شده با عرض ۱۲ سانتیمتر

شکل ۲-۲۷ ورق کرکره‌ای شده پس از انجام اصلاحات اولیه دستگاه را نشان می‌دهد. بر خلاف مرحله قبل، این بار ورق با عرض ۱۲ سانتیمتر فرم‌دهی و به شکل کرکره‌ای در آمد تا چالش‌های این مرحله با

استفاده از ورق با عرض مورد نظر بررسی شود. بررسی‌ها اولیه بر روی ورق کرکره‌ای شده و همچنین مقایسه آن با ورق کرکره‌ای شده استفاده شده در نمونه مرجع نشان می‌دهد که فرم کرکره‌ای مورد نظر بر روی ورق تا حد بسیار زیادی حاصل شده است. به منظور بررسی پارامترهای هندسی، از یک نمونه از این ورق پس از قرارگیری در مانت و آماده‌سازی تصاویر میکروسکوپی تهیه و مورد پردازش قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۲-۲۸ قابل مشاهده است. بر طبق این نتایج، دامنه کرکره‌ها بین $1030\text{ }\mu\text{m}$ تا $1121\text{ }\mu\text{m}$ (میانگین $= 1075/5\text{ }\mu\text{m}$) طول موج آن‌ها بین $2213\text{ }\mu\text{m}$ تا $2276\text{ }\mu\text{m}$ (میانگین $= 2244/5\text{ }\mu\text{m}$) و شعاع راس بین $506/2\text{ }\mu\text{m}$ تا $528/9\text{ }\mu\text{m}$ (میانگین $= 517/5\text{ }\mu\text{m}$) می‌باشد. در این مرحله، به منظور بهبود عملکرد دستگاه فرم‌دهی و بروز خطاهای کمتر استفاده از راهنما قبل از عبور ورق از غلطک‌ها در دستور کار قرار گرفت.

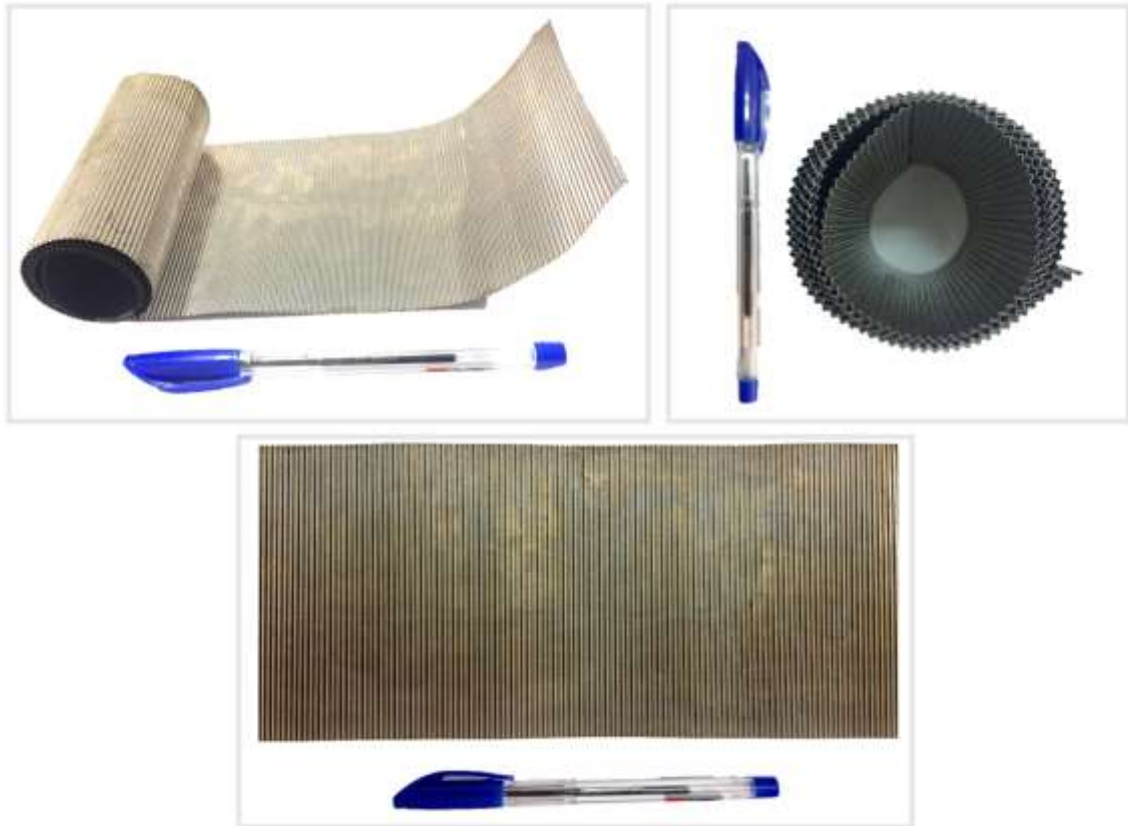


شکل ۲-۲۷- تصویری از ورق کرکره‌ای شده با عرض ۱۲ سانتیمتر.



شکل ۲-۲۸- تصاویر میکروسکوپی ورق کرکره‌ای شده با عرض ۱۲ سانتیمتر پس از قرارگیری در مانیت به همراه نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ورق کرکره‌ای شده اولیه، الف) دامن، ب) طول موج و ج) شعاع راس کرکره‌ها.

نمونه ورق کرکره‌ای شده پس از اضافه کردن راهنما به دستگاه در شکل ۲-۲۹ قابل مشاهده است. بررسی ظاهری نشان می‌دهد اعوجاج‌های ایجاد شده بر روی ورق که ناشی از سرخوردگی به دلیل ضخامت بسیار کم آن بوده است، پس از استفاده از راهنما دیگر بر روی ورق کرکره‌ای شده مشاهده نمی‌شود. در واقع استفاده از راهنما باعث شده است که ورق در حین حرکت به سمت غلطک‌های فرم‌دهی هیچگونه انحرافی از مسیر نداشته باشد. همچنین فرم هندسی ورق نیز همانند مرحله قبل مطلوب و مورد تایید است. نتایج حاصل تا این مرحله نشان می‌دهد که دغدغه‌های موجود به منظور فرم‌دهی ورق به شکل کرکره‌ای تا حد زیادی حل شده است. با این وجود، پس از تکمیل دستگاه طی چند مرحله علاوه بر ارزیابی عملکرد آن، ورق کرکره‌ای شده و پارامترهای هندسی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



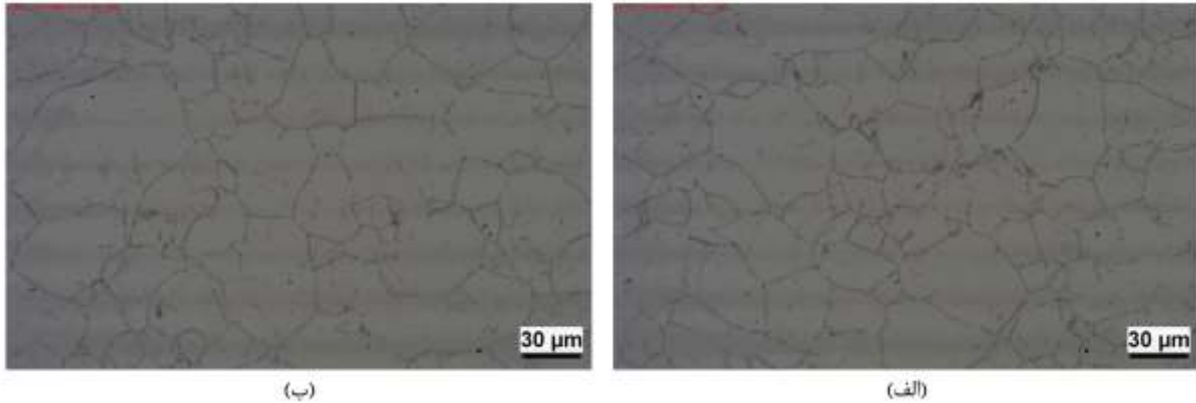
شکل ۲-۲۹- تصاویر ورق کرکره‌ای شده به عرض ۱۲ سانتیمتر پس از اصلاح دستگاه فرم‌دهی و اضافه شدن راهنما.

۲-۶ - بررسی آلیاژ مورد استفاده در پین‌های نمونه مرجع

آلیاژ مورد استفاده در ساخت پین‌های نمونه مرجع مطابق مستندات دریافتی از جنس فولاد ضدزنگ نسوز ۱/۴۸۲۸ یا همان AISI ۳۰۹ می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲-۳ آمده است. به منظور بررسی‌های بیشتر از پین مورد استفاده در نمونه کارکرده دریافتی یک نمونه تحت آماده سازی و متالوگرافی قرار گرفت. شکل ۲-۳۰ ریزساختار آن را نشان می‌دهد. همانطور که در تصاویر قابل مشاهده است، ریزساختار آن آستنیتی است که مطابق با ترکیب شیمیایی و گرید فولاد عنوان شده در مستندات دریافتی می‌باشد.

جدول ۲-۳- ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۴۸۲۸ مورد استفاده در ساخت پین نمونه مرجع (اعداد برحسب درصد)

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	N	Fe
Max. 0.20	19-21	11-13	2	1.5- 2.50	Max. 0.045	Max. 0.015	Max. 0.11	balance



شکل ۲-۳۰- تصاویر ریزساختار پین مورد استفاده در نمونه مرجع در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر.

۲-۷ - تهیه فولاد مناسب و ساخت پین

پس از بررسی فولاد مورد استفاده در پین‌های نمونه مرجع و با توجه به مستندات دریافتی، فولاد نسوز ضدزنگ ۱/۴۸۲۸ بصورت گرد به قطر ۶ میلیمتر تهیه شد. برخی مشخصات این فولاد به همراه ترکیب شیمیایی آن که حاصل از انجام آزمون کوآتومتری می‌باشد در جدول ۲-۴ آمده است. گواهی آزمون کوآتومتری انجام شده نیز در شکل ۲-۳۱ آورده شده است. پس از تهیه فولاد، ساخت پین‌های مورد نیاز توسط ماشینکاری به تعداد مورد نیاز و مطابق با مستندات دریافتی و نمونه شاهد انجام شد.

جدول ۲-۴- برخی مشخصات فولاد تهیه شده برای ساخت پین

Grade	
Grade	1.4828 (X15CrNiSi 20-12)
Diameter	6 mm
Chemical Composition (%)	
C	0.025
Cr	19.06
Ni	11.97
Mn	1.41
Si	1.41
P	0.001
S	0.003
N	0.048



عنوان طرح: دستیابی به دانش فنی تولید مبدل های کاتالیستی پایه فلزی

سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

Test Certificate



آزمایشگاه همکار اداره استاندارد خراسان رضوی (Khr/1542)

آزمایشگاه متالورژی مشهد باران

درخواست کننده: جهاد دانشگاهی مشهد
آدرس: ...
تلفن: ۰۹۱۵۱۵۷۲۹۳۶
فکس: ...
نام و کد قطعه: ...
کد ره یابی آزمایشگاه: ۱۱۵۳۰۱۱
تاریخ انجام آزمون: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵
تاریخ نمونه برداری: ...
تاریخ صدور گواهی: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶
شرایط محیط هنگام انجام آزمون
دما: ۲۸°C رطوبت
استاندارد: ISIRI ۱۰۹۷۹

Symbol	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
Burn 1	<64.7	0.021	1.42	1.39	<0.001	0.003	18.88	12.07	0.101	0.01
Burn 2	<64.7	0.027	1.41	1.41	<0.001	0.002	18.99	11.92	0.1	0.01
Burn 3	<64.4	0.026	1.41	1.44	<0.001	0.003	19.32	11.92	0.102	0.012
Avg	<64.6	0.025	1.41	1.41	<0.001	0.003	19.06	11.97	0.101	0.01

Symbol	Cu	Co	Ti	Nb	V	W	N	Mg
Burn 1	0.72	0.268	0.01	0.036	0.046	0.083	0.05	0
Burn 2	0.71	0.281	0.01	0.035	0.048	0.081	0.057	0
Burn 3	0.68	0.279	0.01	0.034	0.052	0.076	0.057	0
Avg	0.71	0.276	0.01	0.035	0.049	0.08	0.048	0

توضیحات و تفاسیر:

با توجه به آنالیز، الیاز فوق در گروه فولاد های رنگ تون نزدیکترین استاندارد AISI 308 می باشد.

نام و امضاء مدیر فنی

نام و امضاء آزمون کننده

مشهد بزرگراه آسیایی، نبش آزادی ۱۱۳

کد فرم: MCF-18

کدبازنگری: 06

تلفن: ۰۵۱-۳۶۵۸۴۵۲۵

اطلاعات پشت صفحه مطالعه گردد.

شکل ۲-۳: گواهی آزمون کوانتومتری انجام شده بر روی الیاز تهیه شده برای ساخت پین.



۸-۲- امکان‌سنجی تولید ورق نازک فولاد ضدزنگ مقاوم به حرارت

پس از جلسه برگزار شده با حضور ریاست محترم جهاد دانشگاهی در تاریخ ۹۹/۴/۲۴ و تاکید ایشان بر اضافه شدن مرحله تولید آلیاژ، بدون فوت وقت، مطالعات گسترده‌ای برای تولید آلیاژ و ورق مبدل کاتالیست فلزی شروع شد. با توجه به مشخصات ارسالی و همچنین مهندسی معکوس نمونه، ضخامت ورق، پنجاه میکرومتر (۰/۰۵ mm) تعیین گردید. در ادامه مطالعات مشخص گردید ضخامت ورق برای این کاربرد بین ۰/۰۳ یا ۰/۰۶ میلیمتر تعیین شده است، بر این اساس مطالعات گسترده‌ای جهت بررسی تولید ورق با مشخصات فوق انجام گرفت که اجمالاً نتیجه مطالعات به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

تولید ورق شامل سه مرحله می‌باشد:

۱- تولید مذاب فولاد ضد زنگ مقاوم به حرارت CrAl 20-5 X 8 CrAl 20-5 و تهیه اسلب نازک.

۲- انجام چند مرحله نورد گرم به منظور تولید اسلب با ضخامت ۲ تا ۴ میلیمتر.

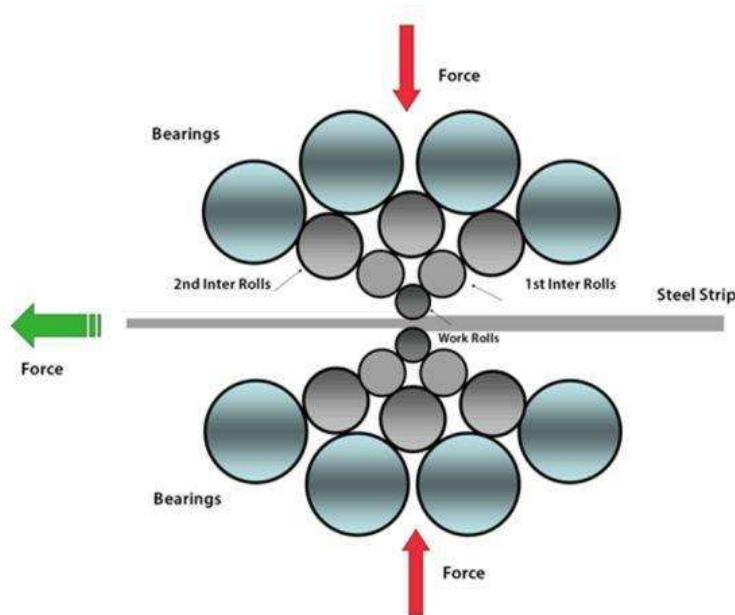
۳- انجام نورد سرد اسلب تولید شده به منظور کاهش ضخامت تا ۰/۰۵ میلیمتر.

در مرحله تولید ورق که در گروه تولید ورق‌های سرد قرار می‌گیرد با توجه به اینکه ضخامت نهایی ورق بسیار پایین و در دسته Ultra-Thin sheet metal است، علاوه بر انجام چند مرحله نورد گرم اولیه (یا در برخی موارد انجام روش ریخته‌گری اسلب نازک و سپس انجام نورد گرم اولیه) تولید مذاب با روش‌های معمول، مانند کوره‌های القایی امکان پذیر نیست. زیرا وجود آخال‌های متداول (ناخالصی‌های فلزی و غیر فلزی) در فرایند ذوب، امکان تولید ورقی با ضخامت مدنظر را عملاً غیر ممکن می‌سازد. لذا جهت تولید مذاب فولاد آلیاژی از روش‌های تولید مذاب تمیز مانند ^۱VIM-VAR یا سایر روش‌های مشابه مانند روش ذوب مجدد سرباره‌ای، ^۲ESR و یا داشتن تجهیزات مربوط به فولادسازی ثانویه شامل واحدهای گاززدایی تحت خلأ و کوره‌های پاتیلی (VD/VOD - LF) مورد نیاز می‌باشد. در این روش‌ها گستره وسیعی از فرایندها شامل اکسیژن زدایی، کربن زدایی، آلیاژسازی در محدوده خواص معین انجام و افزایش تمیزی فولاد با جداسازی یا اصلاح آخال‌ها و بیشترین میزان همگنی ترکیب شیمیایی و دما را به دنبال دارد. خوشبختانه امکان تولید مذابی با چنین ویژگی برای کاربرد مورد نظر (علیرغم قیمت بالا و تولیدکنندگان محدود آن بالاخص در مقیاس آزمایشگاهی) وجود دارد و از این لحاظ مرحله اول تولید ورق قابل انجام است.

^۱ Remelting Vacuum Induction Melting-Vacuum Arc

^۲ Electro Slag Remelting

در مرحله بعد نورد گرم اسلب نازک ریخته‌گری شده (یا نورد گرم اسلب ریخته‌گری شده توسط روش ریخته‌گری اسلب‌های نازک با توجه به وجود کارگاه‌های نورد که در سطح کشور وجود دارند در این فاز نیز مشکلی وجود ندارد و امکان تولید ورق به ضخامت بین ۲ تا ۴ میلیمتر با امکانات موجود، قابل انجام است؛ اما در مرحله بعد از این قسمت، یعنی انجام نورد سرد اسلب نازک به منظور کاهش ضخامت تا ۰/۵ میلیمتر جهت بدست آوردن ضخامت مورد نظر، صرفاً باید از روش نورد خوشه‌ای استفاده نمود که روش^۲ انحصاری تولید ورق‌های بسیار نازک و فویل‌ها می‌باشد. شکل ۲-۳۲ طرح شماتیکی از روش نورد خوشه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۲- طرح شماتیک روش نورد خوشه‌ای.

به طور خلاصه در این روش قفسه‌های خوشه‌ای با قطر غلتک‌های کاری بسیار کوچک بکارگرفته می‌شود که تعدادی غلتک‌های پشتیبان نیز در آن وجود دارد تا ضمن انتقال حرارت سریع‌تر، از کج‌روی و خمش الاستیک غلتک‌های کاری جلوگیری شود تا تولید فویل‌های بسیار نازک (با ضخامت کمتر از ۰/۱ میلیمتر) با دقت مناسبی انجام گیرد. کاربرد این روش در دسته موارد تکنولوژی بالا محسوب می‌شود که با^۳ تحقیقات گسترده و استعمال از بسیاری از تولیدکنندگان ورق‌های فولادی که طی یک ماه و نیم انجام شد به طور قطع می‌توان ادعا کرد در مورد فولادهای آلیاژی در هیچ یک از واحدهای صنعتی کشور از کوچک تا

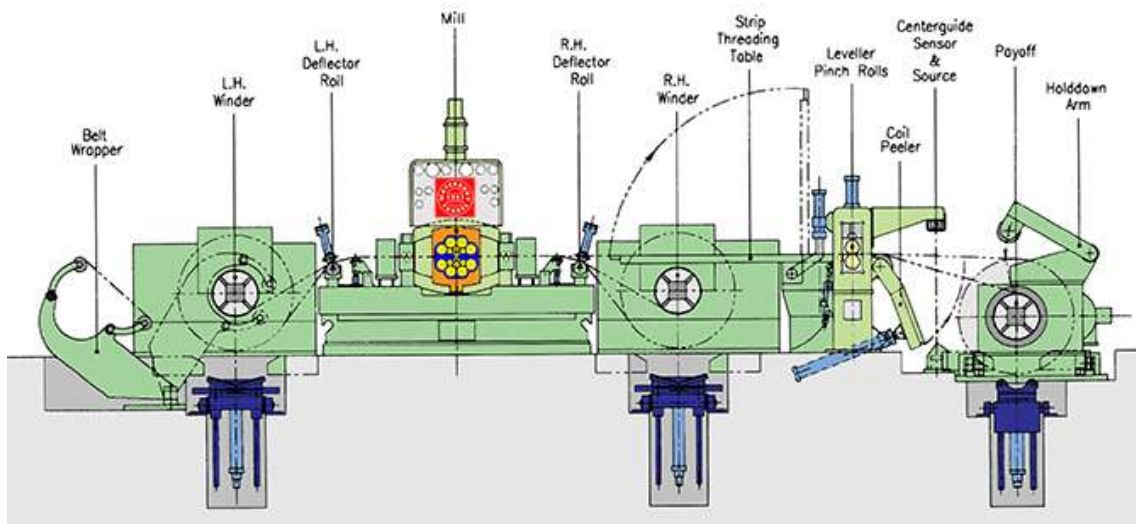
^۱ Thin Slab Casting

^۲ Cluster Rolling

^۳ High Tech

بزرگ مانند مجتمع فولاد مبارکه، مجتمع اکسین اهواز، فولاد کاویان و مجتمع گیلان (بعنوان چهار تولید کننده ورق فولادی برتر کشور) دستیابی به چنین ضخامتی برای تولید ورق از خانواده فولادها وجود نداشته و تنها در مجتمع فولاد مبارکه، محصولات فولادی قلع اندود با ضخامت حداقل حدود ۰/۱۸ میلیمتر تولید می‌شود. حتی تلاش‌ها برای انجام خرید خدمت در مقیاس آزمایشگاهی (جهت تدوین دانش فنی) به نتیجه نرسید.

در ادامه تحقیقات جهت حل این مشکل، خرید دستگاه نورد خوشه‌ای و یا ساخت آن در دستور کار قرار گرفت که با توجه به مباحث تحریم و همچنین احتیاط بیش از اندازه‌ای که شرکت‌های خارجی لحاظ می‌کنند، حتی در مرحله استعلام قیمت نیز با دشواری‌های فراوانی مواجه شدیم ولی بطور تقریبی قیمتی که تاکنون بدست آمده برای دستگاه نوردی با ظرفیت ۱۰,۰۰۰ تن در سال حدود یک میلیون و پانصد هزار دلار استعلام گردید که با مشاوره‌های کارشناسان، رقمی نزدیک به واقعیت ارزیابی گردید. اما در حال حاضر به جهت اینکه هنوز نگارنده گزارش به قطعیت نرسیده است از تعیین قیمت نهایی اجتناب می‌گردد. نمونه‌ای از خط تولید بصورت شماتیک در شکل ۲-۳۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۳- طرحی از خط تولید نورد خوشه‌ای.

در رویکرد بعدی، ساخت خط نورد فوق الذکر در دستور کار قرار گرفت که این مورد نیز بدلیل دخیل بودن پارامترهای متعدد (مثل طراحی غلتک‌ها و تامین دستگاه‌های مختلف آن) و همچنین استفاده از یک برند معتبر جهت انتقال تکنولوژی و تکمیل زنجیره تولید مونولیت، تاکنون اطلاعات جمع‌آوری شده جهت رسیدن به نتیجه قطعی کافی نمی‌باشد. بطور خلاصه برای ساخت دستگاه مورد نظر با فرض اینکه تولید ورق



با ضخامت ۲ تا ۴ میلیمتر با روش نورد گرم صورت پذیرفته باشد، نیاز به چند قفسه نورد می‌باشد که محاسبات ابتدایی تعداد غلتک‌های قفسه نورد را بالای ۱۶ غلتک نشان می‌دهد که علاوه بر آن به پنج قفسه نورد نیز نیاز است که برای مراحل ^۱TL، ^۲PS، ^۳DL، ^۴SPM و ^۵BA مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قفسه‌ها نیز بین ۲ تا ۸ غلتک نیاز دارند. از آنجائی که فرایند تولید این ورق کاملاً متفاوت است و تولید آن نیز در انحصار چند کشور است، مباحث محاسباتی سنگینی برای آن پیش‌بینی می‌گردد که البته امکان‌پذیر است؛ ولی در خصوص قیمت، عملاً پروپوزال احداث یک کارخانه کوچک نورد باید لحاظ گردد. زیرا در حال حاضر در داخل کشور تولید این نوع ورق، سرمایه‌گذاری نشده است. لذا جدا از بحث سرمایه‌گذاری سخت‌افزاری و ایجاد دانش باید زمان قابل ملاحظه‌ای برای ساخت دستگاه در نظر گرفت که به جهت زمان‌بر بودن، عملاً نقض غرض در اجرای هدف طرح خواهد بود.

با این حال از آنچه تاکنون قطعیت یافته است با توجه به آمار تولید یا حتی واردات ورق‌های بسیار نازک و همچنین مبدل‌های کاتالیستی فلزی در خودرو (با وجود مزیت عملکردی نسبت به سرامیکی) و پیش‌بینی به نتیجه رسیدن تحقیقات در این زمینه، اختصاص خط نورد سرد (در هر دو حالت خرید و یا ساخت) صرفاً برای چنین کاربردی به صرفه نخواهد بود. از دلایل این نتیجه‌گیری می‌توان به وزن ورق مورد نیاز در ساخت هر مونولیت فلزی اشاره نمود، مشخصات دریافتی شرکت داینکس، وزن هر مونولیت فلزی بدون پوشش را بین ۵۵۰ تا ۶۵۰ گرم با طول ۱۲ سانتیمتر نشان می‌دهد که بیانگر میزان مصرف بالایی نیست مگر اینکه آمار تولید خودرو در کشور بالا باشد. مقایسه آمار تولید خودرو (اعم از سواری، وانت، کامیون، مینی‌بوس و اتوبوس) طی سال‌های ۹۷، ۹۸ و شش ماهه اول سال ۹۹ کاهش قابل ملاحظه‌ای در تولید خودرو را نشان می‌دهد (طبیعتاً این آمار بیانگر تعداد مبدل کاتالیستی مورد نیاز نیز می‌باشد). به عنوان مثال در بخش خودروهای سواری در سال ۹۸ تعداد ۷۵۹,۱۳۷ دستگاه خودرو تولید شده (به نقل از سایت اقتصاد آنلاین) که بر اساس گزارش رسمی دفتر صنایع خودرو و نیرومحرکه وزارت صمت، این تیراژ تولید نسبت به سال ۹۷ حدود ۱۵ درصد کاهش داشته است (خاطر نشان می‌سازد بدلائل نامشخص، وزارت صمت و انجمن خودروسازان آمار دقیقی از تولید خودرو ارائه نمی‌دهند و لذا دسترسی به این اطلاعات محدود می‌باشد).

^۱ Tension Leveling

^۲ Precision Slitting

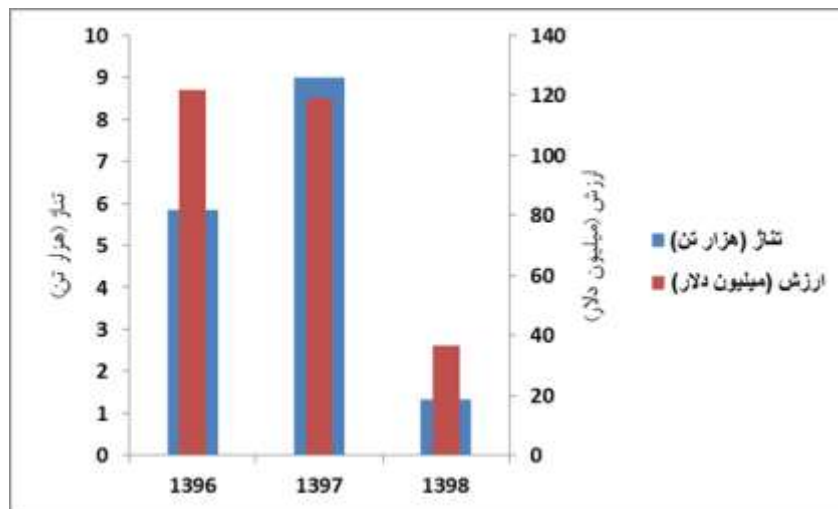
^۳ Decreasing Line

^۴ Skin Pass Mill

^۵ Bright Annealing

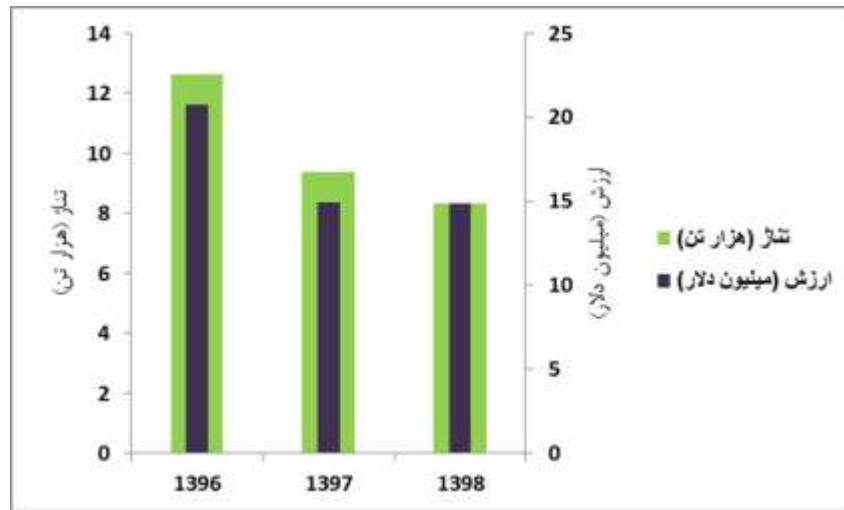


از طرفی نگاهی به آمار واردات مجموعه مرتبط با مبدل‌های کاتالیستی خودرو اعم از مجموعه اگزوز میانی و مبدل کاتالیست، هسته مرکزی فیلترهای تصفیه دود اگزوز خودرو بدون محافظ فلزی و پوشش داده شده، فیلترهای تصفیه دود اگزوز خودرو، هسته مرکزی فیلترهای تصفیه دود اگزوز خودرو پوشش داده نشده (مطابق عناوین کد تعرفه تعریف شده در گمرک) مبین این مطلب است که در سه سال گذشته نیز این آمار روند کاهشی داشته است که در نمودار شکل ۲-۳۴ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۳۴- آمار واردات مجموعه مرتبط با مبدل‌های کاتالیستی خودرو.

به عنوان دلیلی دیگر، آمار بدست آمده از میزان واردات "ورق فولاد ضد زنگ نورد سرد شده با ضخامت کمتر از ۰/۵ میلیمتر" نشان می‌دهد واردات این نوع محصول طی سه سال گذشته کاهش قابل توجه و در عین حال قابل تاملی داشته است. این روند کاهشی در شکل ۲-۳۵ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۳۵- آمار واردات ورق‌های فولاد ضدزنگ نورد سرد با ضخامت کمتر از ۰/۵ میلیمتر.

این در حالی است که ظرفیت تولید واحد تاندم پنج قفسه نورد سرد فولاد مبارکه، ۱/۵ میلیون تن در سال می‌باشد. لذا وجود خطوط تولید محدود به دلیل مصرف پایین و از طرفی خاص اینگونه محصولات، علت عدم رغبت صنایع فولاد سازی داخلی در تولید ورق‌هایی با چنین ابعادی را توجیه پذیر می‌سازد. اگرچه خاطر نشان می‌سازد علیرغم اقتصادی نبودن تولید برخی محصولات استراتژیک، سرمایه‌گذاری برای دستیابی به خودکفایی به جهت پیشرو بودن و پیدا کردن بازار بالقوه، حائز اهمیت و ارزشمند است.

بعنوان جمع بندی این بخش از گزارش، پیشنهاد می‌گردد با توجه به گستردگی بالای کار و از طرفی طولانی بودن زمان رسیدن به نتیجه توأمان فنی/اقتصادی در تولید ورق‌های نازک آلیاژی، طرح در دو فاز انجام گیرد. بدین صورت که مطابق پروپوزال قبلی مصوب، دستیابی به دانش فنی تولید مونولیت فلزی مطابق مشخصات شرکت داینکس (که تاکنون نتایج مناسبی در مرحله شکل‌دهی ورق بدست آمده است) تا حصول اطمینان از تولید مبدل کاتالیستی فلزی به منظور دستیابی به دانش فنی قطعه مذکور، ادامه یابد. در یک طرح فناورانه جداگانه دارای ارزش افزوده، تولید ورق‌های نازک فولادهای آلیاژی نه فقط برای صنعت خودرو، بلکه برای طیف وسیعی از کاربردها شامل صنایع ساختمانی، لوازم خانگی، صنایع فلزی، صنایع غذایی و صنایع حمل و نقل به عنوان دانش فنی انحصاری در جهاد دانشگاهی در دستور کار و انشاء... تا حصول نتیجه مطلوب پیگیری گردد. البته همانطور که بیان گردید، این واحد آمادگی و توان این طرح را با پیش‌بینی حداقل دو سال و حدود شصت میلیارد ریال اعتبار را دارا می‌باشد که شامل ذوب، تولید اسلب نازک، انجام نورد گرم، ساخت دستگاه نورد سرد در مقیاس آزمایشگاهی (که هزینه این مورد به تنهایی بیش از ۴۰ میلیارد ریال برآورد می‌شود)، شکل‌دهی و رول کردن ورق تولید شده و نهایتاً تدوین دانش فنی و ارائه به صنعت خواهد بود. در صورت اقتصادی بودن تولید انبوه، قطعاً با توجه به مزیت عملکردی و بومی‌سازی



دانش فنی به عنوان یک گزینه برتر نسبت به مبدل‌های کاتالیستی سرامیکی، مورد استقبال صنایع خوروسازی نیز قرار خواهد گرفت.

خاطر نشان می‌سازد امکان‌سنجی تولید ورق‌های نازک، حاصل بیش از دویست ساعت مطالعه و مشاوره با کارشناسان صنعت فولاد و صنعت خودرو از جمله فولاد مبارکه، فولاد اکسین، فولاد سبا، فولاد آلیاژی ایران، فولاد کاویان، فولاد گیلان، ایمیدرو، زامیاد، ساپکو، آگروز خودرو خراسان و می باشد که بطور خلاصه در این بخش گزارش آورده شده است.

۲-۹ - طراحی و ساخت دستگاه تابانیدن

گام بعدی در جهت ساخت مونولیت فلزی خام پس از موفقیت در فرم‌دهی ورق در هر دو شکل مد نظر، تابانیدن ورق‌ها به منظور رسیدن به شکل نهایی مبدل می‌باشد. در این مرحله چالش‌های متفاوتی مثل شکل بیضوی مونولیت، تابانیدن بدون محور، وزن کم ورق و ... وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. در این مرحله امکان سعی و خطا بدون ساخت بدنه و اجزا دستگاه تابانیدن وجود نداشت، بنابراین مطابق با طراحی‌های صورت گرفته ساخت بدنه و اجزای مختلف دستگاه تابانیدن پس از تهیه مواد و تجهیزات مورد نیاز شروع شد. برخی از مواد و تجهیزات تهیه شده مانند موتور، گیربکس، بلبرینگ، هرزگرد و ... به منظور ساخت دستگاه تابانیدن در شکل ۲-۳۶ آورده شده است.



شکل ۲-۳۶: برخی مواد و تجهیزات تهیه شده به منظور ساخت دستگاه تابانیدن.

در ادامه، ساخت بدنه و اجزا دستگاه تابانیدن در دستور کار قرار گرفت. در این مرحله پس از تهیه مواد اولیه ماشین‌کاری قطعات نیز مطابق طراحی‌های صورت گرفته انجام شد. شکل ۲-۳۷ مراحل ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۷: تصاویری از مراحل ساخت بدنه و اجزا دستگاه تابانیدن.

پس از تکمیل فرآیندهای ماشین‌کاری اجزا مختلف، بخش‌های مختلف دستگاه مطابق با طراحی‌های صورت گرفته بر روی بدنه نصب شد که در شکل ۲-۳۸ قابل مشاهده است. با توجه به نحوه عملکرد دستگاه و طراحی صورت گرفته، در این دستگاه و به منظور تابانیدن ورق‌ها ابتدا هر دو رول ورق بعد از فرم‌دهی بر روی دستگاه (قسمت رول بازکن‌ها که با شماره ۱ و ۱۲ مشخص شده است) نصب خواهد شد. سپس ورق‌ها بر روی هم قرار گرفته و با عبور از یک راهنما که با شماره ۳ در شکل نشان داده شده است، وارد منطقه تابانیدن (شماره ۴) خواهند شد. راهنما استفاده شده علاوه بر هدایت ورق‌ها به سمت منطقه تابانیدن، با اعمال نیروی فشاری مناسب ورق‌ها را بر روی هم قرار می‌دهد. همچنین با تحت کشش قراردادن ورق‌ها فرآیند تابانیدن را تسهیل می‌کند. در منطقه تابانیدن دستگاه فضایی تعبیه شده است تا مقطع مورد نظر برای تابانیدن در آن فضا قرار گیرد و ورق‌ها حول آن و به کمک نیرو موتور تابانیده شوند. شکل ۲-۳۷ دستگاه تابانیدن پس از تکمیل اجزای مختلف آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۸: بخش‌های مختلف دستگاه تابانیدن.

پس از تکمیل سازه و اجزای مختلف دستگاه باید سطح مقطعی که تابانیدن ورق‌ها توسط آن انجام می‌شود انتخاب شود. سطح مقطعی که تابانیدن حول آن انجام شود باید ضمن داشتن استحکام کافی، پس از تابانیدن و خروج از میان مبدل اثری از خود باقی نگذارد. در این مرحله سطح مقطع‌های مختلف مانند ورق‌ها با ابعاد مختلف استفاده شد، اما هیچکدام نتیجه مطلوب مورد نظر را به همراه نداشت. در نهایت، استفاده از سیم‌های مسی با ضخامت ۱ میلی‌متر در دستور کار قرار گرفت که در شکل ۲-۳۹ مشاهده می‌شود. قطر سیم به نحوی انتخاب شده است که برابر با حفرات مونولیت خواهد بود، بنابراین با بیرون کشیدن آن پس از تابانیدن، هیچ فضای خالی اضافی در مونولیت باقی نخواهد ماند. مهمترین چالش در استفاده از سیم این است که باید به اندازه کافی تحت کشش باشند تا مقاومت لازم را برای تابانیدن ورق‌ها داشته باشند. بنابراین از یک گیربکس برای نصب سیم‌ها و تحت کشش قرار دادن آن‌ها استفاده شده است. چالش دیگر در استفاده از دو عدد سیم برای تابانیدن، همزمان بودن چرخش آن‌ها می‌باشد. در صورتی که چرخش سیم‌ها همزمان نباشد، سیم‌ها به دور هم خواهند چرخید. بنابراین چرخش سیم‌ها به کمک مکانیزم طراحی شده توسط یک موتور به طور کاملاً همزمان و هم محور انجام می‌شود.



شکل ۲-۳۹: منطقه تابانیدن دستگاه.

پس از استفاده از این سیستم، تابانیدن ورق‌ها با موفقیت انجام شد. در این دستگاه تابانیدن ورق‌ها تا زمان رسیدن به قطر مشخصی که توسط سنسور نصب شده تشخیص داده می‌شود ادامه می‌یابد. سپس و به منظور رسیدن به فرم بیضوی نهایی مونولیت، ورق‌های تابانیده شده در قالب طراحی و ساخته شده بدین منظور قرار می‌گیرند. پس از قرارگیری مونولیت در این قالب، شکل نهایی حاصل می‌شود. همچنین پین‌گذاری مونولیت توسط این قالب انجام می‌شود. شکل ۲-۴۰ این قالب را نشان می‌دهد. در نهایت، پس از تایید عملکرد دستگاه، ظاهر و تابلو برق دستگاه همانطور که در شکل ۲-۴۱ دیده می‌شود تکمیل شد.



شکل ۲-۴۰: قالب نهایی ساخت مونولیت.



شکل ۲-۴۱: ظاهر نهایی دستگاه تابانیدن.

در سیستم کنترل این دستگاه که بر روی پنل نصب شده است، قابلیت تنظیم سرعت دستگاه (با امکان نمایش سرعت آن بر روی پنل تعبیه شده) فراهم است. تابلو برق دستگاه نیز مجهز به فیوز حافظ جان، دیمر به منظور کنترل سرعت و جهت حرکت موتور می‌باشد.

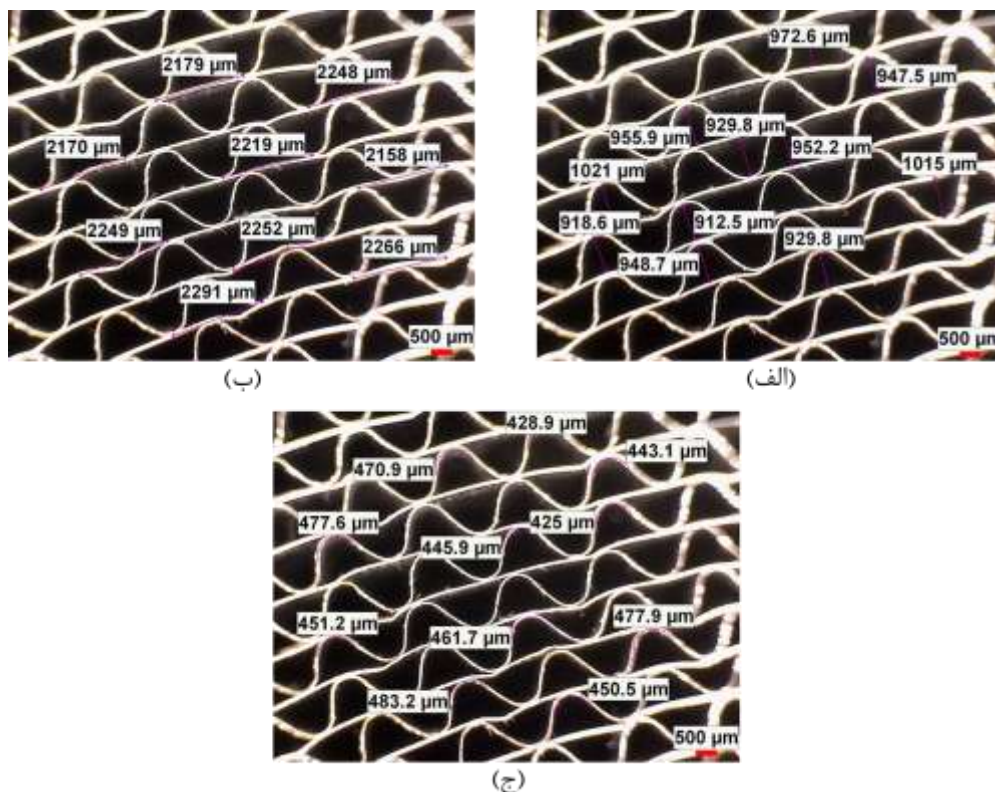
۲-۱۰ - بررسی مونولیت فلزی خام تولید شده

در فرآیند تولید، چندین نمونه مونولیت خام تولید و مشخصات آن شامل ابعاد، فشردگی و ... بررسی شد. شکل ۲-۴۲ مونولیت نهایی تولید شده را در کنار نمونه مرجع نشان می‌دهد. ابعاد نمونه مرجع به این دلیل که برای انجام فرآیندهای مهندسی معکوس از آن باز شده است کوچکتر از مقدار اولیه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، مشابهت زیادی از نظر فرم هندسی و پارامترهای ظاهری فضاهای خالی مونولیت وجود دارد. پس از تایید کنترل ابعادی مونولیت مطابق با نقشه دریافتی از شرکت زامیاد، تصاویر میکروسکوپی از مونولیت خام به منظور انجام بررسی‌های بیشتر تولید شد.



شکل ۲-۴۲- تصویر نمونه مونولیت خام تولید شده در کنار نمونه مرجع از دو نمای مختلف.

پس از تهیه تصاویر میکروسکوپی از مونولیت خام تولیدی، پارامترهای هندسی آن همانطور که در شکل ۲-۴۳ آورده شده است، توسط نرم‌افزارهای پردازش تصویر اندازه‌گیری شده است. نتیجه حاصل از اندازه‌گیری نشان می‌دهد که دامنه کرکرها بین $912/5 \mu m$ تا $1021 \mu m$ (میانگین $= 954/87 \mu m$)، طول موج آن‌ها بین $2158 \mu m$ تا $2291 \mu m$ (میانگین $= 2003 \mu m$) و شعاع راس بین $428/9 \mu m$ تا $483/2 \mu m$ (میانگین $= 455/9 \mu m$) می‌باشد. این نتایج تطابق بسیار خوبی با پارامترهای هندسی نمونه مرجع دارد.



شکل ۲-۴۳: نتایج اندازه‌گیری پارامترهای هندسی مونولیت خام تولید شده، (الف) دامنه، (ب) طول موج و (ج) شعاع راس کرکرها.



سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

عنوان طرح: دستیابی به دانش فنی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی

فصل سوم:

جمع‌بندی



گزارش حاضر به منظور ارائه نتایج حاصل از پروژه دستیابی به دانش فنی تولید مبدل‌های کاتالیستی پایه فلزی و شرح اقدامات صورت گرفته در فاز اول تهیه شده است. طبق مواردی که در این گزارش بیان شده است، مونولیت خام فلزی پس از فرم‌دهی ورق و تابانیدن تولید شده است که از نظر ابعادی و فرم هندسی تطابق بسیار خوبی با نمونه مرجع دارد. در ادامه، پروژه در فاز دوم با عنوان "دستیابی به دانش فنی فرآیند نشاندن اجزاء فعال کاتالیستی بر روی مونولیت فلزی مبدل‌های کاتالیستی" در حال پیگیری است. در این راستا، پس از مطالعه منابع مختلف و جمع‌آوری اطلاعات لازم، تجهیزات و مواد اولیه مورد نیاز تهیه و فعالیت‌های اجرایی در خصوص دستیابی به دانش فنی پوشش دهی مونولیت آغاز شده است.



منابع

- [1] Cleveland C J and Morris C 2014 Handbook of Energy Vol-II (Elsevier).
- [2] Degobert, p., Automobiles and Pollution, Editions OPHRYS, Paris, 1995.
- [3] Lefebvre, A. H. "Pollution control in continuous combustion engines." Symposium (International) on Combustion. Vol. 15. No. 1. Elsevier, 1975.
- [۴] غیاث الدین، منصور، آلودگی هوا، تالیف هنری پرکینز، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم، ۱۳۸۰.
- [5] Rood, Shawn, et al. "Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 234.4 (2020): 936-949.