Archive of SID

METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Summer 2019, Volume 22, number 2

A Review of Magnesium Industry in Iran – Opportunities and Threats

***Alireza Sadeghi[1], Sahel Mohammadi[2]**

1- Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran Iran.

Citation: Sadeghi A, Mohammadi S. A Review of Magnesium Industry in Iran – Opportunities and Threats. Metallurgical Engineering 2019: 22 (2): 144-160 http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.96427.1215

doi : http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.96427.1215

ABSTRACT

In the last two decades, efforts for increasing Magnesium (Mg) applications and finding solutions for overcoming its limitations have increased. At the same time, production and demand for Mg alloys have also increased significantly in the international markets. In response to the international trends, attention to Mg production and its consumption has also grown in Iran. In the present paper different technologies of Mg production has been briefly introduced and local opportunities in Mg production are summarized and elaborated. Despite the existence of important opportunities in local Mg production, including easy access to low cost and clean energy, raw material and workforce, Mg production features high potential important threats. Different threats to local Mg production including limitation in access to appropriate raw material and access to large working capital are further discussed in this paper. At the end, amongst investigating the history of Mg production, supply and demand in Iran, main structural and metallurgical applications of Mg in local industries are described. Technical and financial feasibility studies indicate that Iran has major advantages in production and consumption of Mg and this industrial sector will experience major growth in the future.

Keywords: Mg Production, Supply and demand of Mg in Iran, Silicothermic reduction, Primary metal production, Ferrosilicon.

Received: 28 October 2018 | Accepted: 7 July 2019

* *Corresponding Author*:
Alireza Sadeghi, PhD
Address: School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Tel: +98 (21) 61119936
E-mail: alireza.sadeghi@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مروری بر صنعت منیزیم در ایران - تهدیدها و فرصت‌ها

*علیرضا صادقی[۱]، ساحل محمدی[۲]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

در دو دهه اخیر تلاش‌های گسترده‌ای به منظورافزایش استفاده از منیزیم و یافتن راه حل‌های مناسب برای مقابله با محدودیت‌های آن صورت گرفته است. در این راستا تولید و تقاضا آلیاژهای منیزیم نیز در بازارهای بین المللی با رشد قابل توجهی همراه بوده است. در ایران نیز توجه به تولید و به کارگیری این فلز گسترش یافته است. در تحقیق حاضر تلاش شده است در ابتدا روش‌های تولید منیزیم به طور مختصر معرفی و سپس با بررسی ویژگی‌های هر روش، مزیت‌های نسبی ایران در تولید منیزیم گردآوری و ارائه شود. علی رغم وجود مزیت‌های مهم از جمله فراوانی مواد اولیه، در دسترس بودن انرژی و نیروی کار ارزان، تولید منیزیم با تهدیدات بالقوه‌ای همراه می‌باشد. در ادامه این مقاله به تهدیدات صنعت تولید منیزیم اولیه مانند موانع تامین مواد اولیه مناسب و سرمایه در گردش در کشور پرداخته شده است. در نهایت ضمن بررسی سوابق تولید، عرضه و تقاضای منیزیم در ایران کاربردهای اصلی متالورژیکی و سازه ای منیزیم در صنایع ایران معرفی شده‌اند. بررسی‌های فنی و اقتصادی نشان می‌دهد که با توجه به مزایای رقابتی ایران برای تولید و استفاده از این فلز، صنعت منیزیم در کشور با توسعه قابل ملاحظه‌ای همراه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تولید منیزیم، عرضه و تقاضای منیزیم در ایران، احیا سیلیکوترمی، تولید فلزات اولیه، فروسیلیسم.

دریافت: ۱۳۹۷/۸/۶ | **پذیرش:** ۱۳۹۸/۴/۱۶

۱. مقدمه

تولید فلز منیزیم و استفاده از آن در ایران در مقایسه با سایر فلزات صنعتی سابقه کمتری داشته وکمتر توسعه یافته است. دلایل متعددی برای این عدم توسعه قابل ذکر است که از جمله این دلایل می‌توان به تقاضای بین المللی کمتر آن نسبت به آلومینیوم و عدم اطلاع صنعتگران و سرمایه‌گذارن کشور از مزایای نسبی تولید منیزیم در ایران اشاره نمود. از سوی دیگر صنایع پایین دستی منیزیم نیز مانند فرآیندهای تولید قطعات از طریق ریخته‌گری، اکستروژن و یا تولید پودر در کشور توسعه قابل قبولی نیافته است. در حالی که ۱۱ هزار کارخانه و کارگاه فعال در زمینه آلومینیوم [۱] هستند، که حداکثر ۲۰ شرکت در کشور به طور مستقیم بر روی منیزیم، آلیاژها و فرآیندهای مرتبط با آن متمرکز شده‌اند. یکی دیگر از این دلایل، عدم اطمینان از تامین پیوسته مواد اولیه از خارج کشور و ترس از احتمال احتراق منیزیم و بروز حادثه می‌باشد[۲]، [۳]. علی رغم وجود محدودیت‌ها، در بکارگیری آلیاژهای منیزیم در برخی کاربردهای صنعتی، مزایای استفاده از آن به قدری قابل توجه است که جامعه علمی و صنعتی در تلاشی گسترده برای رفع این محدودیت‌ها فعالیت می‌نمایند[۴]، [۵]، [۶]، [۷]. خواص منحصر به فرد این فلز سبب شده است که در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به تولید آن شود. (شکل ۱) میزان تولید منیزیم در در دنیا طیده سال اخیر را نشان می‌دهد. میزان تولید منیزیم در کشور چین به عنوان بزرگترین کشور تولید کننده منیزیم در سال ۲۰۱۸ به مقدار ۹۳۰ هزار تن بوده است[۸].

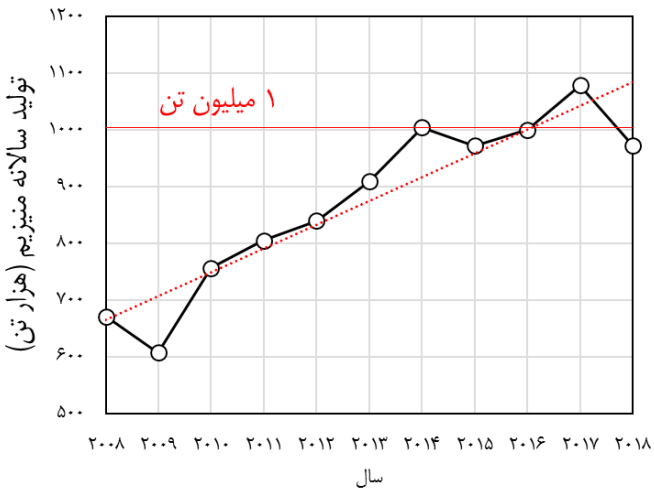
در (شکل۲) تحقیقات منتشر شده در ارتباط با آلیاژهای منیزیم در صنعت خودرو از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸ بر اساس آمار پایگاه اطلاعاتی"Web of Science" نشان داده شده است[۹]. نمودار زیر بیانگر افزایش سریع حجم تحقیقات در زمینه آلیاژهای منیزیم در مقایسه با فلزات جایگزین مانند فولادهای ضد زنگ است.

در نتیجه این تحقیقات، امروزه از آلیاژهای منیزیم برای

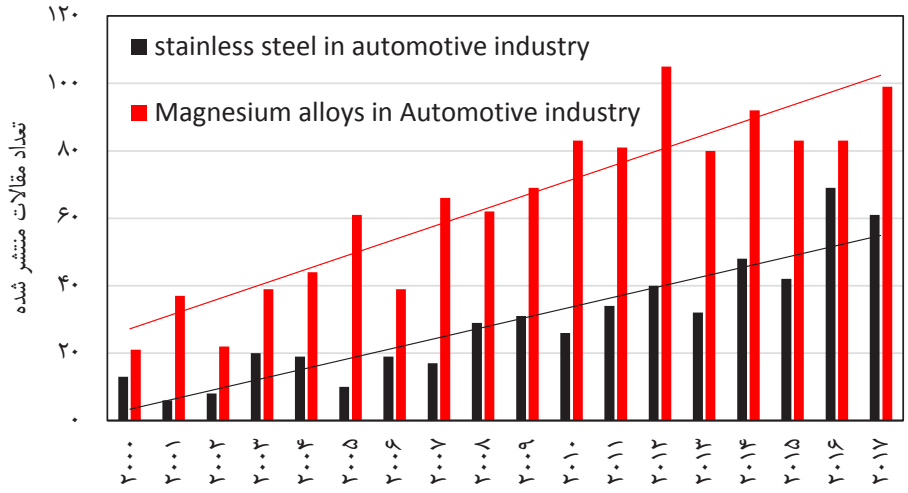
* نویسنده مسئول:
دکتر علیرضا صادقی
نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی مکانیک.
تلفن: ۶۱۱۱۹۹۳۶ (۲۱) ۹۸+
پست الکترونیکی: alireza.sadeghi@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. میزان تولید سالانه منیزیم در جهان[۸].



شکل ۲. نمودار تحقیقات منیزیم و فولاد زنگ نزن طی ۲۰ سال گذشته در صنعت خودرو[۹].

ساخت قطعاتی استفاده می‌گردد که در گذشته به هیچ عنوان تصور استفاده از منیزیم برای آن ممکن نبود[۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. از جمله این پیشرفت‌ها می‌توان به سه مورد زیر اشاره کرد:

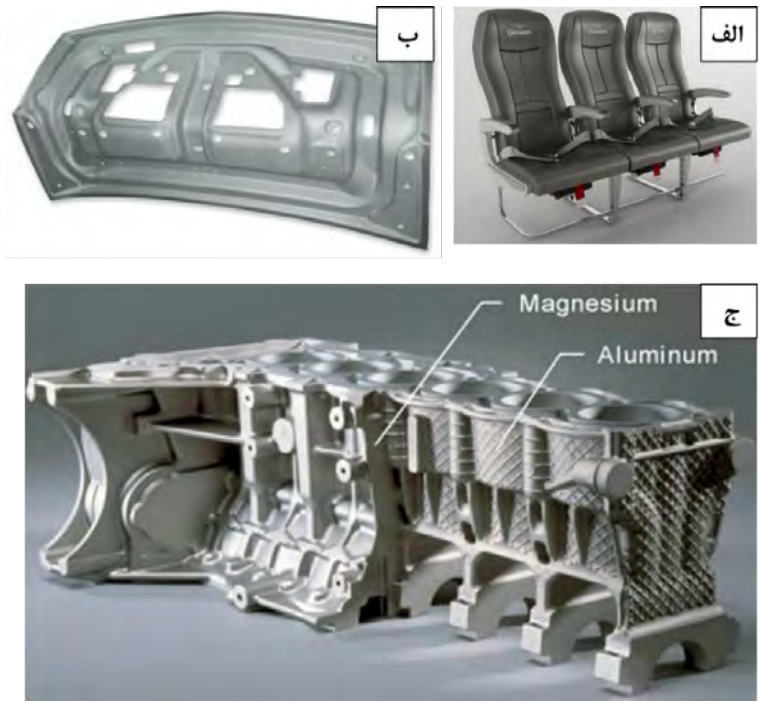
۱- در گذشته به دلیل دمای احتراق پایین، بر اساس استانداردها استفاده از آلیاژهای منیزیم داخل کابین هواپیماهای مسافربری ممنوع بوده است. اما امروزه با توسعه دانش و تحقیقات گسترده در زمینه احتراق این آلیاژها، تولید آلیاژهایی از منیزیم با دمای احتراق بالاتر از آلومینیوم و تجاری سازی شده است. قابلیت اطمینان این آلیاژها به حدی است که با بکار گیری این آلیاژهای مخصوص در صندلی‌های جدید هواپیماهای مسافربری سبب کاهش وزن قابل توجهی در هواپیماها حاصل شده است (شکل ۳- الف) [۱۴].

۲- یکی دیگر از کاربردهای نوین منیزیم استفاده از آن برای قطعه داخلی درب صندوق عقب می‌باشد. شرکت جنرال موتورز با بکارگیری این روش نوین شکل‌دهی ورق‌های منیزیم در دمای بالا توانسته است ورق‌های منیزیم را به مقدار قابل توجهی تغییر شکل داده و قطعات پیچیده را به صورت انبوه تولید نماید (شکل ۳- ب) [۱۵]. لازم به توضیح است که آلیاژهای منیزیم با توجه به ساختار شش وجهی و کمبود سیستم‌های لغزش آسان و مستقل، از شکل پذیری پایینی برخوردار بوده و شکل پذیری ورق‌های منیزیمی بسیار دشوار می‌باشد.

۳- از جمله نوآوری‌های دیگری که سبب توسعه به کارگیری منیزیم شده، یافتن راه‌حل برای کاربرد آن‌ها در دمای بالا و مقاومت به خزش پایین آن می‌باشد. با توسعه آلیاژهای نوین حاوی استرانسیوم، آلیاژهای حاصل به منظور ساخت سرسیلندر موتور شش سیلندر بی ام و مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳- ج) [۱۶].

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. نمونه‌هایی از کاربردهای جدید آلیاژهای منیزیم که با توسعه تکنولوژی امکان تولید آن فراهم شده است. (الف) صندلی هواپیمای مسافربری ساخته شده با آلیاژ مقاوم به احتراق [۱۴]، (ب) شکل‌دهی داغ ورق منیزیم برای تولید قطعه داخلی درب صندوق عقب [۱۵]، (ج) پوسته موتور شش سیلندر بی‌ام و ساخته شده از آلیاژ مقاوم به خزش [۱۶].

در سال‌های اخیر افراد و شرکت‌های متعددی در ایران به امید کسب منافع مالی، تولید و گسترش صنایع پایین دستی منیزیم را در بخش‌های مختلف آغاز کرده اند. به نظر می‌رسد امید ورود به بازارهای بکر و دست نخورده و تولید محصولات جدید در این حوزه افراد زیادی را نسبت به این صنعت علاقمند نموده است[۱۷]. با این وجود صنعت منیزیم نیز مانند سایر صنایع تولیدی مزایا و تهدیداتی به همراه دارد[۱۸]. در مطالعه پیش رو تلاش شده است که وضعیت فعلی تولید فلز منیزیم و صنایع پایین دستی آن معرفی و سپس مورد تحلیل قرار گیرد. از جمله سرفصل‌های مطالعه شده در این تحقیق می‌توان به (۱) مزایای رقابتی تولید این فلز در ایران نسبت به سایر مناطق دنیا، (۲) افق‌های پیش رو صنایع مرتبط با منیزیم، (۳) گرداوری فعالیت‌هایی که تا به امروز در این صنعت صورت پذیرفته و (۴) موارد مصرف فعلی منیزیم در ایران و مقایسه آن با شرایط فعلی در دنیا اشاره نمود.

فرآیند تولید منیزیم

دو روش اصلی تولید منیزیم روش الکترولیز و روش سیلیکوترمی (احیای حرارتی با سیلیسیم) می‌باشد[۱۹]،[۲۰]. در روش الکترولیز دسترسی آسان به کلرید منیزیم و همچنین برق ارزان بسیار حائز اهمیت است. همانطور که از نام فرآیند و ماده اولیه آن مشخص است، در فرآیند الکترولیز کلرید منیزیم مقدار قابل توجهی گاز کلر در دمای بالا تولید می‌شود. وجود این دو پارامتر در کنار هم پیچیدگی کنترل فرآیند را چند برابر می‌نماید[۲۱]. علاوه بر این پیچیدگی‌ها، در این فرآیند، منیزیم و کلرید آن که در حالت مذاب کنار یکدیگر قرار می‌گیرند به راحتی با یکدیگر مخلوط شده و عملا تفکیک صد در صد آنها از یکدیگر با روش‌های متداول و ارزان‌قیمت امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این رو معمولاً در شمش‌های تولید شده به روش الکترولیز مقداری ترکیبات کلریدی وجود دارد که مقاومت به خوردگی قطعات تولید شده با آن را به شدت کاهش می‌دهد. علی‌رغم کاهش فزاینده تعداد کارخانه‌هایی که با این روش به تولید منیزیم می‌پردازند، کماکان در برخی نقاط جهان که کلرید منیزیم و برق ارزان در اختیار است، این روش به حیات خود ادامه می‌دهد [۲۲] [۲۳].

همانطور که در ابتدا عنوان شد روش دیگر تولید منیزیم روش احیای حرارتی با سیلیسیم یا سیلیکوترمی است [۲۴]. فرآیند سیلیکوترمی روشی ارزان‌تر نسبت به روش الکترولیز می‌باشد. در (جدول ۱) مواد خام مورد استفاده و همچنین پارامترهای مهم دیگر در دو روش الکترولیز و سیلیکوترمی آورده شده است[۲۵]. لازم به ذکر است که تولید بالای منیزیم به روش سیلیکوترمی در این کشور اثرات مخرب زیست محیطی زیادی نیز به همراه داشته است [۲۵]. در سال ۲۰۱۸ میزان تولید منیزیم به روش الکترولیز حدود ۹۹ هزار تن در سال و به روش سیلیکوترمی ۸۲۰ هزار تن در سال

www.SID.ir

جدول ۱. مقایسه دو روش الکترولیز و سیلیکوترمی[۲۵].

روش تولید	الکترولیز	سیلیکوترمی
مواد خام	مگنزیت- دولومیت- آب دریا- بیسوفیت	دولومیت- مگنزیت
نوع انرژی	برق- گاز- نفت	گاز- ذغال سنگ
میزان مصرف انرژی MWh\tonnes of Mg))	۲۸-۱۸	۸۰-۴۵
میزان سرمایه گذاری (US $/ tonne of Mg)	۱۰۰۰۰ - ۱۸۰۰۰	≤ ۲۰۰۰
میزان تولید گاز گلخانه‌ای (گاز CO_2) در هر تن تولید منیزیم	۱۷ تن	۳۴ تن
نیروی انسانی مورد نیاز	X	۵X

بوده است[۲۵] و [۸]. عامل اصلی توسعه روش سیلیکوترمی در دنیا، خلوص بالای منیزیم تولید شده به این روش (حدود ۹۹/۹۵ % خلوص) همچنین فراوانی منابع دولومیت می‌باشد[۲۵].

همانطور که در (جدول ۱) مشاهده می‌شود نیروی انسانی مورد نیاز و مصرف انرژی در روش الکترولیز بسیار پایین تر از روش سیلیکوترمی می‌باشد، اما میزان سرمایه گذاری در این روش بسیار بالاتر است[۲۵]. لازم به ذکر است که قیمت منیزیم تولید شده در هر روش به میزان فراوانی دولومیت، انرژی برق و نیروی کار ارزان وابسته است. که در کشورهایی مانند آمریکا، روسیه و اکراین همچنان از روش الکترولیز در تولید منیزیم استفاده می‌کنند این در حالی است که در کشوری مانند چین، به عنوان بزرگ‌ترین کشور تولید کننده منیزیم به دلیل نیروی کار ارزان، فراوانی فروسیلیسم و دسترسی به منابع دولومیت فراوان از تکنولوژی سیلیکوترمی در تولید منیزیم بهره‌برداری شده است [۲۱]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹].

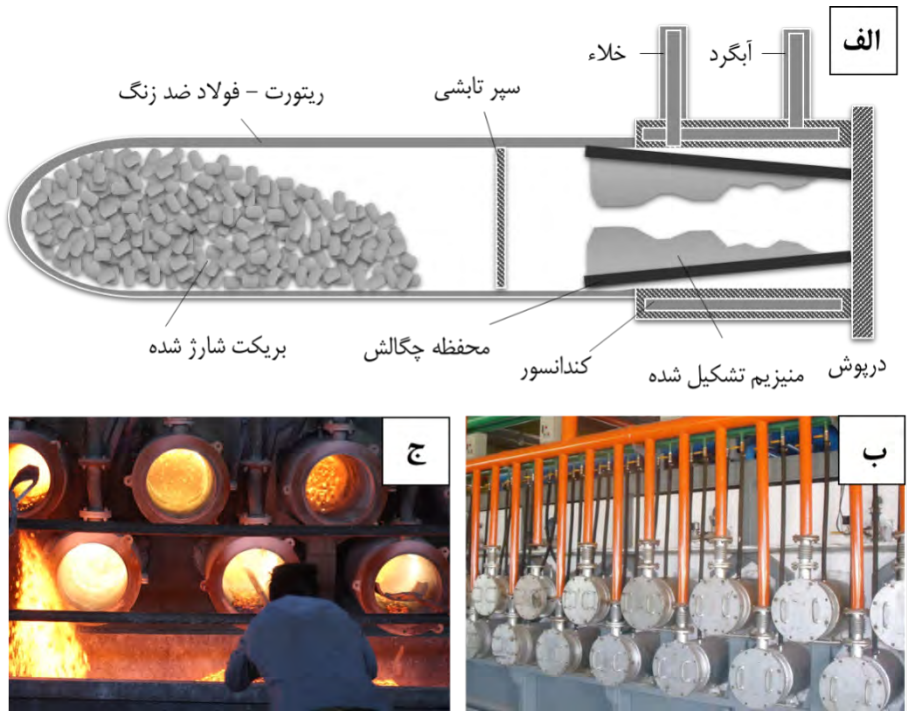
بنابراین ازجمله معایب روش سیلیکوترمی بهره‌وری پایین، نیاز به نیروی کار بالا و مصرف انرژی زیاد آن می‌باشد. بدین ترتیب استفاده از منبع انرژی بالا در این روش بسیار حایز اهمیت است. از طرفی اثرات مخرب گلخانه‌ای و افزایش دمای جهانی با استفاده از این روش بسیار بالا است. این اثرات مخرب تقریبا ۵۰% از آلومینیوم و یک مقدار بیشتر از فولاد می‌باشد که در استفاده از این روش بایستی به این موارد توجه ویژه‌ای کرد[۲۱].

در روش سیلیکوترمی بر خلاف روش الکترولیز که برای استحصال کلرید منیزیم از آب دریا و یا شورابه‌ها استفاده می‌شد، از کانی دولومیت با ترکیب $MgCO_3CaCO_3$ (کربنات دوگانه منیزیم و کلسیم) استفاده می‌شود. در این روش پس از استخراج سنگ معدن دولومیت و خردایش اولیه، دولومیت در داخل کوره‌های دوار و در دمای بالا کلسینه می‌شود. در این فرآیند CO_2 از ترکیب کریستالی خارج می‌شود و دولومیت کلسینه شده (CaO.MgO) حاصل می‌گردد. دولومیت کلسینه شده پودر سفید نرمی است که به همراه فروسیلیسم (منبع تامین‌کننده سیلیسیم به عنوان ماده احیا کننده) و سایر افزودنی‌های (با غلظت خیلی کم) به نسبت تقریبا ۲۰% فروسیلیسم و ۸۰% دولومیت وارد آسیاب گلوله‌ای می‌شود. در آسیاب گلوله‌ای خردایش انجام شده و پودر نرم حاصل با عبور از میان غلتک‌های مخصوص به بریکت تبدیل می‌شود. بریکت‌های حاوی گرد فشرده شده دولومیت کلسینه شده و فروسیلیسم به منظور احیا به داخل کوره‌های مخصوص شارژ می‌شوند[۳۰]، [۳۱]، [۳۲]. این کوره‌ها شامل تعداد زیادی استوانه فولادی با طول تقریباً سه متر و قطر ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر می‌باشند. این استوانه‌ها به صورت افقی (در برخی فناوری‌ها به صورت عمودی)داخل اتاقک کوره مشعل دار قرار گرفته و دمای آنها تا حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد بالا می‌رود[۳۳]، [۳۴]. در اصطلاح صنعتی این استوانه‌ها ریتورت نامیده می‌شوند. در (شکل ۴) تصویر شماتیک از یک ریتورت افقی نشان داده شده است.

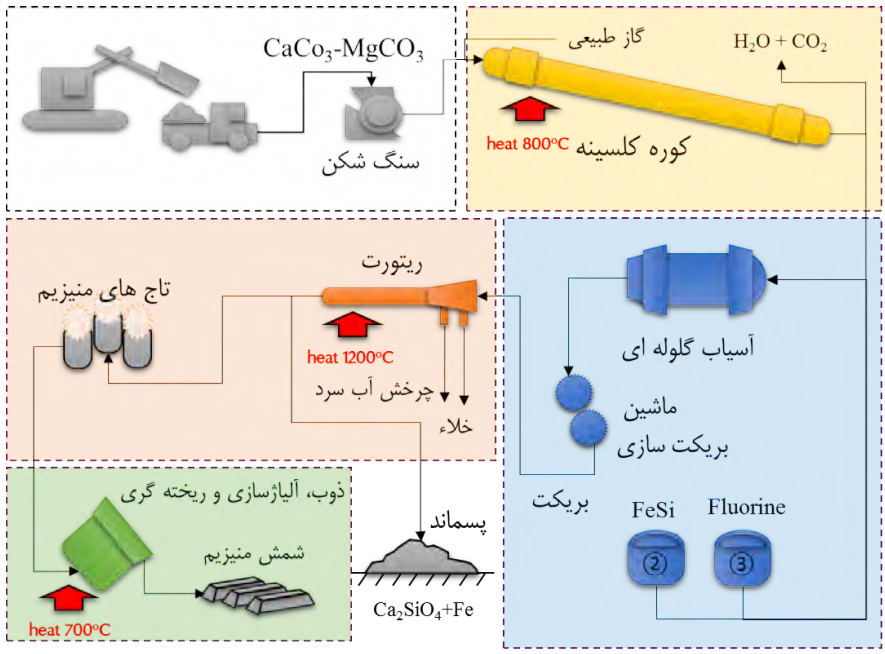
پس از شارژ بریکت‌ها، درپوش ریتورت بسته می‌شود و شرایط خلاء در داخل استوانه ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب واکنش احیای منیزیم در اثر ایجاد خلاء و در دمای بالا صورت می‌پذیرد. لازم به ذکر است که در شرایط فشار اتمسفر این واکنش به پیش نمی‌رود و اعمال خلا سبب می‌شود دمای شروع واکنش پایینتر آمده و برای ریتورت‌های فولادی قابل تحمل باشد. با پیشروی واکنش احیا، اکسیژن و کلسیم موجود در ترکیب CaO.MgO با SiO_2 موجود در فروسیلیسم واکنش داده و تشکیل Ca_2SiO_4 می‌دهند[۳۵]. همراه با تشکیل این ترکیب گاز منیزیم نیز متصاعد می‌شود و با سرعت به سمت انتهای سرد ریتورت (محفظه چگالش متصل

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. فرآیند احیا در روش تولید منیزیم به روش سیلیکوترمی، (الف) تصویر شماتیک از سطح مقطع طولی ریتورت احیا منیزیم (ب) مجموعه ریتورت‌های نصب شده در داخل کوره شرکت تیوا تجارت ماهان، اصفهان و (ج) تخلیه بریکت‌های مصرف شده پس از تکمیل سیکل احیا در کارخانه تولید منیزیم فردوس، خراسان جنوبی.



شکل ۵. شماتیک فرآیند احیا حرارتی (سیلیکوترمی) منیزیم.

به کندانسور) حرکت و در آنجا به فاز جامد تبدیل می‌شود. با چگالش منیزیم، این فلز از تعادل با واکنش دهنده‌های داخل ریتورت خارج شده و واکنش به سمت پیشروی بیشتر هدایت می‌شود. کریستال‌های منجمد شده منیزیم با خلوص ۹۹/۸ درصد در مرحله بعد ذوب، پالایش و نهایتاً به شکل شمش منیزیم ریخته‌گری می‌شوند [۳۶]، [۳۷]. در(شکل۵) شماتیک فرآیند احیا منیزیم به روش سیلیکوترمی نشان داده شده است.

www.SID.ir

۲. مزیت‌های نسبی ایران در تولید منیزیم

مقایسه شرایط تولید منیزیم در ایران با سایر کشورهای دنیا و تولید سایر فلزات از جنبه‌های مختلفی توجیه پذیر است و در مقایسه با سایر فرآیندهای تولید فلزات اقتصادی‌تر می‌باشد. از جمله مزیت‌های اصلی تولید منیزیم در ایران می‌توان به موارد زیر اشاره نمود[۳۸]، [۳۹]، [۴۰].

۱- فراوانی سنگ‌های دولومیتی مناسب برای تولید منیزیم
۲- دسترسی آسان به انرژی گاز طبیعی
۳- فرآیند دوستدار محیط‌زیست از لحاظ تولید آلودگی و مصرف آب
۴- نیاز فرآیند تولید منیزیم به نیروی کار ارزان– ایجاد اشتغال
۵- حجم سرمایه‌گذاری به مراتب پایین‌تر در مقایسه با تولید سایر فلزات
۶- قابلیت تفکیک کارخانه به اجزا منفک با سرمایه‌گذاری پایین‌تر

هر یک از مزایا و ویژگی‌های مذکور در ادامه به تفصیل شرح داده خواهد شد.

فراوانی سنگ‌های دولومیتی مناسب برای تولید منیزیم

همانطور که توضیح داده شد، ماده اولیه تامین کننده منیزیم در روش احیای حرارتی دولومیت می‌باشد. کشور ما از حیث وجود سنگ‌های دولومیتی بسیار غنی محسوب می‌شود. معادن دولومیت در ایران در استان‌های مختلف گسترده شده و بسیاری از این معادن در حال حاضر برای صنایع ساختمانی و فولاد در حال بهره‌برداری می‌باشند[۴۱]، [۴۲]، [۴۳].

پنجاه میلیون تن ذخایر دولومیت در کشور وجود دارد که میزان ۴۰% این ذخایر در استان همدان واقع شده است که به خاطر کیفیت مطلوبش در صنعت شیشه، کاشی و سرامیک مورد استفاده قرار می‌گیرد همچنین مهمترین مسیله دولومیت هزینه بالای حمل و نقل آن است، استفاده از سرویس حمل و نقل ارزان مثل خطوط ریلی می‌توان نقش مهمی را در کاهش هزینه تمام شده منیزیم ایفا کرد[۴۴]. در بسیاری از این معادن سنگ‌های دولومیتی به عنوان سنگ ساختمانی استحصال‌شده و به عنوان سنگ لاشه فروخته و استفاده می‌شود. قیمت این ماده معدنی به حدی پایین است که هزینه حمل آن از قیمت سنگ بیشتر می‌باشد. برای درک اهمیت این مزیت، مقایسه شرایط دولومیت برای تولید منیزیم و بوکسیت برای تولید آلومینیوم ضروری می‌نماید[۴۵]، [۴۶]. هم اکنون در کشور حدود ۴۰۰ هزار تن آلومینیوم در کارخانجات مختلف تولید می‌شود[۴۷]، که میزان قابل توجهی از بوکسیت و آلومینای مورد نیاز آن (بیش از ۷۰ درصد) از طریق واردات تامین می‌شود. سالانه برای تامین آلومینای مورد نیاز کشور میلیاردها دلار ارز از کشور خارج می‌شود. در شرایط تحریم تامین این ماده معدنی به صورت بحرانی برای این کارخانجات نمود می‌نماید.

نیاز به انرژی گاز طبیعی و دسترسی آسان به آن

در فرآیند تولید منیزیم در واحدهای کلسیناسیون، احیا و ذوب مقدار قابل توجهی انرژی مصرف می‌شود. پاک‌ترین و ارزان‌ترین نوع انرژی قابل استفاده برای تولید فلزات گاز طبیعی می‌باشد[۴۸]. در مقایسه با تولید فولاد به روش کوره بلند و یا تولید مس، آلودگی‌های حاصل از سوختن گاز در فرآیند تولید منیزیم به مراتب پایین‌تر است. حجم گاز مورد نیاز برای این فرآیند حدود ۳۵۰۰مترمکعب برای تولید هر تن منیزیم می‌باشد. با توجه به حجم بالای انرژی، تولید منیزیم در کشورهایی که به گاز ارزان دسترسی ندارند به هیچ عنوان توجیه پذیر نمی‌باشد. نمونه حاضر از این دست تجربه‌های خطرناک، احداث کارخانه ۱۲ هزار تنی تولید منیزیم از دولومیت در ترکیه می‌باشد [۴۹]. به نظر نمی‌رسد که این کارخانه با قطع واردات گاز ترکیه از ایران یا روسیه به هردلیل بتواند حتی یک روز به فعالیت خود ادامه دهد[۵۰].

نکته مهم دیگر مقایسه نوع انرژی مورد استفاده در فرآیند تولید منیزیم با سایر فلزات می‌باشد. بر خلاف آلومینیوم که احیا آن همراه با مصرف عمده برق است، برای تولید منیزیم مستقیماً از گاز طبیعی استفاده می‌شود. لازم به تاکید است که برای تولید برق مصرفی کارخانه آلومینیوم سازی قبلاً گاز طبیعی با راندمان حداکثر ۵۰ درصد مصرف شده است. در ادبیات تجارت بین المللی انرژی گاهی از آلومینیوم به عنوان برق جامد یاد می‌شود. به این مفهوم که کشوری که برق مازاد تولید می‌کند می‌تواند برای ذخیره آن آلومینیوم تولید نماید[۵۱]، [۵۲]، [۵۳]. این فلسفه در کشورهایی مانند کانادا و نروژ و حتی کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفته است. در این کشورها عملاً تولید آلومینیوم به عنوان راهی برای ذخیره انرژی مطرح است. اما در ایران، با وجود تولید بحرانی برق و قطعی‌های برق در تابستان و واردات آلومینا از خارج، مسابقه برای تولید آلومینیوم بیشتر به خودزنی ملی می‌ماند. این در حالی است که انرژی لازم برای تولید منیزیم مستقیما از گاز طبیعی تامین می‌شود و از این رو می‌توان منیزیم را به عنوان گاز جامد جهت ذخیره انرژی در نظر گرفت.

فرآیند دوستدار محیط‌زیست ازلحاظ تولید آلودگی و مصرف آب

نکته دیگر حائز اهمیت، مصرف بسیار پایین آب در فرآیند تولید منیزیم می‌باشد. همانطور که در قبل شرح داده شد، تنها مصرف آب در فرآیند تولید منیزیم استفاده از آن به عنوان خنک کننده کندانسورها در سیکل بسته می‌باشد. این

www.SID.ir

Archive of SID

درحالی است که به ازای تولید هر تن فولاد حداقل ۲۳۰ متر مکعب آب مصرف می‌شود[۵۴]. در فرآیند تولید آلومینیوم نیز به غیر از مصرف آب در نیروگاه تولید برق، مقدار بسیار زیادی آب برای پالایش بوکسیت و تولید آلومینا آب مصرف می‌گردد. در مقایسه می‌توان ادعا کرد که برای تولید منیزیم تقریبا مصرف آب نزدیک صفر می‌باشد.

علاوه بر سازگاری فرآیند تولید منیزیم با ویژگی‌های کم آبی در ایران، در فرآیند احیا و کلسیناسیون این فلز (که بیشترین حجم گاز خروجی را دارد) به هیچ عنوان گاز سمی متصاعد نمی‌شود. این ویژگی با انتشار گازهای سمی حاوی فلئور و گوگرد در تولید آلومینیوم، مس و آهن غیر قابل مقایسه است. با توجه به شرایط زیست محیطی حاکم بر کشور حرکت به سمت تولید با حداقل آلودگی از اولویت‌های ملی است.

نیاز فرآیند تولید منیزیم به نیروی کار ارزان – ایجاد اشتغال

به دلیل نیاز به شرایط خلا در فرآیند احیا منیزیم، تولید این فلز بر خلاف فولاد، مس و آلومینیوم ناپیوسته می‌باشد. در این شرایط ریتورت‌های احیا باید در سیکل‌های دوازده ساعته از بریکت‌های تازه و مصرف شده پر و خالی شوند. این فرآیند شارژ و دشارژ به نیروی کارگر زیاد محتاج است. اساساً یکی از دلایل عدم اقبال کشورهای غربی به روش احیا منیزیم به روش سیلیکوترمی همین نیاز شدید به نیروی کارگر و قیمت بالای آن می‌باشد. چین با استفاده از نیروی کار ارزان توانست فرآیند سیلیکوترمی را به گونه مورد استفاده قرار دهد که امروزه بیش از هشتاد درصد تولید این فلز را به خود اختصاص داده است. در ایران نیز نیروی کار بسیار ارزان (در مقایسه با قیمت‌های جهانی) شرایط مساعدی را از حیث هزینه‌های کارگری فراهم می‌آورد. به طوری که برای تولید سالانه هر ۴۰ تن منیزیم یک فرصت شغلی به صورت مستقیم ایجاد می‌گردد[۵۵]در صورتی که به ازای تولید سالانه هر ۱۳۵ تن آلومینیوم [۵۶]و هر ۶۰ تن فولاد [۵۷] یک فرصت شغلی به صورت مستقیم ایجاد می‌شود، به عبارتی با تولید هر تن منیزیم برای تعداد نفرات بیشتری اشتغال ایجاد خواهد شد.

حجم سرمایه گذاری به مراتب پایین‌تر در مقایسه با تولید سایر فلزات

در مقایسه با تولید سایر فلزات صنعتی (فولاد و آلومینیوم)، کارخانه‌های منیزیم در ابعاد بسیار کوچک‌تری توجیه‌پذیر و قابل احداث می‌باشند. این درحالی است که کارخانه‌های شش هزار تنی تولید منیزیم نیز ازلحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر می‌باشد. به نسبت کوچک شدن ظرفیت تولید سالانه، حجم سرمایه‌گذاری اولیه نیز برای صنعت منیزیم کوچک‌تر می‌باشد. در شرایط روز قیمت کارخانه ۶ هزار تنی تولید منیزیم حدود ۱۴ میلیون دلار است که این رقم در مقایسه با حداقل ظرفیت کارخانه‌های فولاد و آلومینیوم ناچیز است. در شرایط دشوار اقتصادی کشور که تامین سرمایه برای ایجاد اشتغال از دغدغه‌های اصلی متولیان و صاحبان صنعت است. حرکت به سوی تولید منیزیم می‌تواند راه‌گشا باشد [۵۸].

قابلیت تفکیک کارخانه به اجزا کوچک‌تر و کاهش نیاز به سرمایه اولیه

فرآیند احیا سیلیک و ترمی منیزیم به‌گونه‌ای است که هریک از سالن‌های اصلی کارخانه می‌توانند به کارخانهای مجزا تبدیل شود و ازلحاظ فنی نیازی به‌قرارگیری همه آنها در یک‌جا کنار هم نمی‌باشد. در چنین شرایطی سرمایه‌گذاران می‌توانند با حجم کمتر سرمایه، اقدام به تاسیس واحدهای مجزا نمایند. همانطور که در قبل اشاره شد، سالن احیا کارخانه تولید منیزیم شامل تعداد زیادی استوانه ریتورت است که نه بصورت سری بلکه بصورت موازی فعالیت می‌کنند. این ویژگی سبب می‌شود که این اجزا نیز بتوانند از هم تفکیک شوند و مالکیت‌های مجزا داشته باشند. امروز شبیه این تفکیک در چین اتفاق افتاده است و در استان‌هایی که در آن‌ها صنعت منیزیم قرار گرفته شرکت‌های کوچک با تنها چند ریتورت شکل گرفته است که بریکت‌های مورد نیاز خود را (ماده اولیه) از کارخانه‌های کلسیناسیون خریده و بلورهای منیزیم را (محصول) با کارگاه‌های ریخته گری می‌فروشند. در این ساختار اشتغال افزایش یافته و سرمایه داران کوچک نیز می‌توانند در تولید مشارکت داشته باشند. این شرایط قابلیت تقسیم به واحدهای کوچکتر به دلیل ماهیت تولید پیوسته در تولید سایر فلزات قابل پیاده‌سازی نمی‌باشد.

۳. موانع و تهدیدات تولید منیزیم در ایران

علی‌رغم وجود همه مزایای تولید منیزیم در ایران، تولید این فلز همراه با تهدیدات بالقوه است که سرمایه گذاری بدون اطلاع از آن‌ها بسیار خطرناک بوده و قطعا با شکست همراه خواهد شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد اقدام به تولید منیزیم همواره با سه نوع تهدید همراه است. این تهدیدات عبارت‌اند از:

۱- ناتوانی در تامین فروسیلیسم با خلوص و قیمت مناسب
۲- ناتوانی در تامین دولومیت با ویژگی‌های مناسب
۳- ناتوانی در مدیریت سرمایه در گردش بسیار بالا[۵۸].

بررسی اخبار منتشر شده از گوشه و کنار ایران حاکی از این واقعیت است که تعداد زیادی از افراد حقیقی و حقوقی برای تولید منیزیم در ایران ابراز علاقه کرده و تعدادی از آن‌ها اقداماتی نیز انجام داده اند. تعداد مجوزهای صادر شده برای تولید منیزیم از سوی وزارت صمت در ایران از عدد ۱۱

www.SID.ir

Archive of SID

در سال ۹۷ عبور کرده است [۵۹]. عدم توجه به هر یک از تهدیدات ذکر شده منجر به غیر اقتصادی شدن و شکست در سرمایه‌گذاری تولید منیزیم خواهد شد.

تامی نفروسیلیسم مناسب با قیمت پایین

این واقعیت که سنگ معدن منیزیم دولومیت است سبب شده که بسیاری از افراد به اشتباه تصور کنند که دسترسی به معدن دولومیت به تنهایی می‌تواند امکان تولید ارزان منیزیم را فراهم کند. نکته بسیار مهم این است که قیمت سنگ معدن دولومیت در قیمت نهایی منیزیم بسیار پایین است و عملا هیچ نقشی در قیمت نهایی منیزیم ندارد. بر خلاف دولومیت دسترسی به فروسیلیسم ارزان، تعیین‌کننده قیمت نهایی منیزیم می‌باشند. حدود ۵۰ درصد قیمت نهایی منیزیم متاثر از قیمت فروسیلیسم است که مصرف بسیار بالایی در فرآیند تولید منیزیم دارد[۶۰]. یکی از دلایل موفقیت چین در تولید منیزیم صنعت عظیم تولید فروسیلیسم در این کشور می‌باشد[۶۱]. این صنعت متاثر از حجم تولید بسیار بالای فولاد در این کشور توسعه یافته است و سبب شده فروسیلیسم با قیمت و کیفیت مناسب همواره در اختیار کارخانه‌های تولید منیزیم قرار گیرد. در کارخانه‌های فولادسازی از فروسیلیسم برای حذف اکسیژن از مذاب فولاد استفاده می‌شود. برای این فرآیند اندازه کلوخه‌های فروسیلیسم بسیار مهم است به گونه‌ای که هرچه اندازه کلوخه‌ها درشت‌تر باشد راندمان آن‌ها بالاتر و تلفات پایین‌تر است. از این رو کارخانه‌های فولاد سازی مشتری اصلی فروسیلیسم‌های درشت دانه می‌باشند. این در حالی است که فروسیلیسم‌های ریز دانه هم قیمت کمتری داشته و هم تقاضای کمتری برای مصرف آن‌ها در صنایع آهن و فولاد وجود دارد. با این وجود برای کارخانه‌های تولید منیزیم اندازه‌های بسیار بزرگ فروسیلیسم مناسب نیست و بر این اساس آن‌ها می‌توانند به راحتی از محصولاتی که صنعت فولاد بی‌علاقه است به خوبی و با قیمت مناسب استفاده نمایند. علاوه بر اندازه ذرات، پارامتر مهم دیگر در فروسیلیسم مورد نیاز کارخانه‌های تولید منیزیم درصد سیلیسیم است. هر چه خلوص فروسیلیسم بالاتر و آهن آن کمتر باشد فرآیند احیا منیزیم با راندمان بالاتری به پیش خواهد رفت [۶۳]، [۶۴]. در کارخانه‌های تولید فروسیلیسم در ایران خلوص بین ۶۸ تا ۷۰ درصد برای این محصول متداول است. این درحالی است که خلوص ۷۲ درصد برای این ماده اولیه در فرآیند تولید منیزیم توصیه شده است[۶۵]. فرآیند تولید منیزیم همراه با مصرف حجم بالایی از فروسیلیسم می‌باشد، به طوری‌که به ازای هر یک کیلوگرم منیزیم تولیدی حدود ۱/۲ کیلوگرم فروسیلیسم مصرف می‌شود. این نسبت در صنایع فولاد بسیار پایین‌تر است. مشخصات مصرف فروسیلیسم در کارخانه احیا منیزیم نشان می‌دهد که تامین فروسیلیسم با کیفیت مناسب و قیمت مناسب یکی از تهدیدات اصلی تولید منیزیم در ایران می‌باشد.

همانطور که در (جدول ۲) گرداوری و ارائه شده است در بیشتر طرح‌های مصوب تولید منیزیم در ایران، تولید فروسیلیسم دیده نشده است. تولید فروسیلیسم در ایران تنها با هدف تامین نیاز کارخانجات فولادسازی شکل گرفته و ظرفیت اضافی برای استفاده در صنعت تولید منیزیم وجود ندارد. همانطور که اشاره شده است برای تولید هر کیلوگرم منیزیم ۱/۲ کیلوگرم فروسیلیسم مورد نیاز است به عبارتی برای یک تولید ۶۰۰۰ تن در سال منیزیم ۷۲۰۰ تن فروسیلیسم مورد نیاز خواهد بود. این اعداد بسیار نزدیک به ابعاد تولید اقتصادی فروسیلیسم بوده و چنین ظرفیت اضافه‌ای در صنعت فروسیلیسم ایران وجود ندارد. این ادعا حاصل تجربه مستقیم نویسندگان مقاله در مواجهه با اکثر طرح‌های تولید منیزیم در ایران و شرکت در جلسات توجیهی آن‌ها در ایمیدرو می‌باشد.

ناتوانی در تامین دولومیت با ویژگی‌های مناسب

علی رغم قیمت پایین دولومیت و تاثیر اندک آن در قیمت تمام شده منیزیم، نبود حجم عمده ای از آن مساوی با توقف فعالیت کارخانه خواهد بود. بر این اساس سه پارامتر کلیدی برای دولومیت قابل تعریف است:

۱- نسبت مناسب شیمیایی بین کربنات کلسیم و منیزیم
۲- عدم عبور ناخالصی‌های مضر از حد مجاز
۳- فاصله نزدیک معدن تا محل مصرف

ناتوانی در مدیریت سرمایه در گردش بسیار بالا

بنابراین اگر بخواهیم این دو شرایط را در کنار همدیگر داشته باشیم در کل خاورمیانه ایران از مزایای رقابتی زیادی برخوردار است، چرا که تنها جایی است که در آن گاز و انرژی ارزان، دولومیت و منابع فروسیلیسم به وفور وجود دارد. این در حالی است که معادن دولومیت در همه جا وجود ندارد و کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس از لحاظ دولومیت غنی نیستند یا در عراق دولومیت وجود دارد اما از نظر انرژی فقیر می‌باشد.

بنابراین با توجه به مزایایی و ویژگی‌های حائز اهمیتی که در تولید منیزیم وجود دارد می‌توان به این جمع‌بندی دست یافت که تولید منیزیم در ایران بسیار مقرون به صرفه می‌باشد. لازم به ذکر است قیمت فعلی منیزیم (سال ۲۰۱۸) حدود ۲/۵ دلار بر کیلوگرم می‌باشد[۸]، که بر خلاف سایر فلزات مثل مس، آهن و آلومینیوم قیمت منیزیم در LME(London Metal Exchange) تعیین نمی‌شود بلکه با توجه به حجم بالای تولید منیزیم در چین (حدود ۸۰% تولید منیزیم در دنیا) قیمت‌گذاری در این کشور صورت می‌پذیرد[۶۲]. بنابراین با افزایش دسترسی ارزان‌تر و راحت‌تر به منابع مورد نیاز تولید منیزیم می‌توان قیمت نهایی منیزیم تولیدی را به شدت کاهش داد[۶۳].

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. مجوزهای صادر شده جهت تولید منیزیم در ایران مطابق اطلاعات منتشر شده وزارت صمت [۵۹].

ردیف	نام واحدتولیدی	استان	شهر	رشته فعالیت	ظرفیت	فروسیلیسم
۱	شمش فلز رویال	خراسان جنوبی	فردوس	ساخت فلزات اساسی قیمتی وفلزات غیراهنی	۶۰۰۰	-
۲	شرکت خبرگان صنعت اطلس	آذربایجان غربی	ارومیه	ساخت اهن وفولاد اساسی	۶۰۰۰	۱۰۰۰۰
۳	آگاهان راه میهن	کرمانشاه	اسلام آباد غرب	ساخت فلزات اساسی قیمتی وفلزات غیراهنی	۱۲۰۰۰	-
۴	شمش منیزیم مینا کاوان پاژ	خراسان رضوی	زاوه	ساخت سایرمحصولات کانی غیرفلزی طبقه بندی نشده درجای دیگر	۲۴۰۰۰	-
۵	بین المللی منیزیم لامرد	فارس	لامرد	ساخت اهن وفولاد اساسی	۱۲۰۰۰	۱۵۰۰۰
۶	استحکام صنعت سیرجان	کرمان	سیرجان	ساخت سایرمحصولات کانی غیرفلزی طبقه بندی نشده درجای دیگر	۶۰۰۰	-
۷	صنایع فروآلیاژایران	لرستان	ازنا	ساخت فلزات اساسی قیمتی وفلزات غیراهنی	۱۲۰۰۰	-
۸	فروسیلیس غرب پارس	همدان	ملایر	ساخت فلزات اساسی قیمتی وفلزات غیراهنی	۱۲۰۰۰	۲۴۰۰۰
۹	حبیب قیاسی	همدان	نهاوند	موادشیمیایی اساسی به جزانواع کودوترکیبات ازت	۱۲۰۰۰	۱۵۰۰۰
۱۰	شمس منیزیم ارس	منطقه آزاد ارس	محدوده یک	ساخت فلزات اساسی قیمتی وفلزات غیراهنی	۶۰۰۰	-
۱۱	تیوا تجارت ماهان	اصفهان	اصفهان	ساخت فلزات اساسی قیمتی وفلزات غیراهنی	۱۰۰۰	-

جدول ۳. تعرفه و کدهای تعریف شده برای واردات منیزیم به کشور[۶۹].

کد تعرفه	شرح	حقوق ورودی	ارزش افزوده و عوارض دیگر	سال
۸۱۰۴۱۱۰۰	منیزیم بصورت کار نشده، با خلوص حداقل ۹۹/۸ درصد (منیزیم خالص)	%۱۰	%۹	۱۳۹۶
۸۱۰۴۱۹۰۰	منیزیم بصورت کارنشده، باخلوص کمتر از ۹۹/۸ درصد (منیزیم آلیاژی)	%۱۰	%۹	۱۳۹۶
۸۱۰۴۳۰۰۰	براده، تراشه و دانه‌های کوچک، گرانول درجه‌بندی شده برحسب اندازه، پودر از منیزیم	%۴	%۹	۱۳۹۶
۸۱۰۴۲۰۰۰	قراضه و ضایعات از منیزیم	%۴	%۹	۱۳۹۶
۸۱۰۴۹۰۰۰	مصنوعات از منیزیم، که در جای دیگر گفته نشده است (قطعات ساخته شده منیزیمی).	%۴	%۹	۱۳۹۶

۴. سابقه تولید منیزیم در ایران

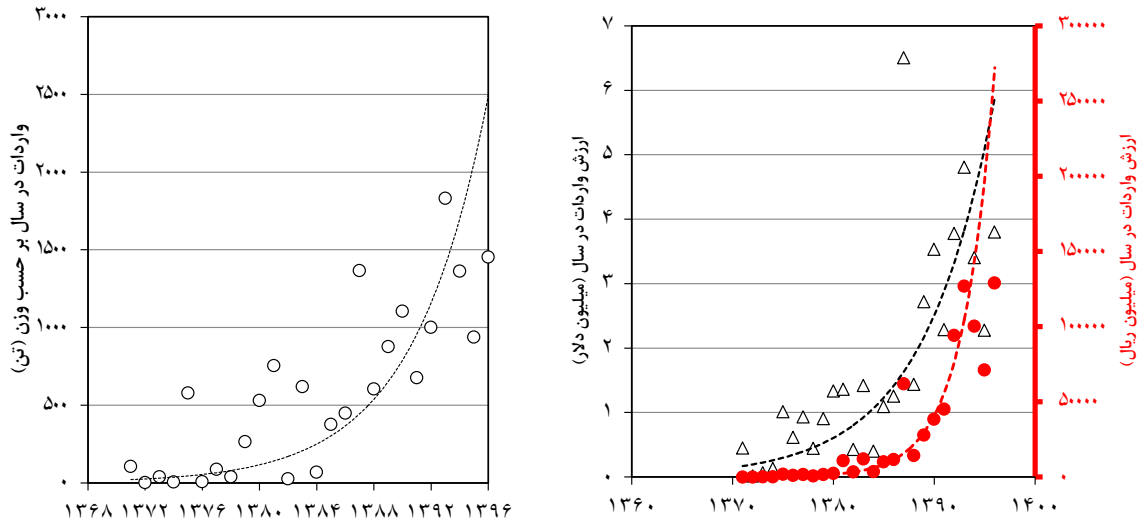
تولید منیزیم اولین بار در ایران در سال ۱۳۸۳ بصورت محدود توسط سازمان انرژی اتمی جهت مصرف در فرآیند استحصال زیرکونیوم صورت گرفت[۶۶]. بدین ترتیب در کارخانه ZPP اصفهان در طی فرآیند کرول از منیزیم به منظور تولید زیرکونیوم استفاده می‌شود. بنابراین منیزیم به عنوان محصول نهایی تولید نمی‌گردد بلکه طی سیکل بسته‌ای کلرید منیزیم به روش الکترولیز به منیزیم تبدیل می‌شود. تولید صنعتی منیزیم تاکنون توسط گروه‌های مختلف مطرح شده که تنها یکی از آن‌ها توانسته به مرحله تولید برسد و دو طرح دیگر کماکان در مراحل اولیه و در حد مطالعات مقدماتی مانده‌اند. از مجموع ۱۱ جواز تأسیس صادره از سوی وزارت صنعت، معدن و تجارت (جدول ۲)، طرح شمش منیزیم فرودس در خراسان جنوبی با ظرفیت ۶۰۰۰ تن در سال به بهره برداری رسیده و سایر طرح‌های تولید شمش منیزیم پیشرفت فیزیکی کمتر از ۴ درصد دارند. البته لازم به ذکر است کارخانه‌ای با ظرفیت ۱۰۰۰ تن در اصفهان در حال راه‌اندازی است که تا اواخر تابستان ۹۷ به بهره‌برداری خواهد رسید[۶۷]، [۶۸].

۵. عرضه و تقاضای منیزیم در ایران

بدون احتساب تولید اخیر منیزیم در کارخانه واقع در خراسان جنوبی، کلیه نیاز کشور به منیزیم از خارج از کشور و از طریق واردات تامین می‌شده است. بر اساس اطلاعات مستخرج از آمار گمرک ایران، محصولات منیزیمی در پنج دسته مطابق (جدول۳) به کشور وارد می‌شود. همانطور که در این جدول نشان داده شده است شمش‌های ریخته‌گری منیزیم به دو گروه منیزیم آلیاژی و منیزیم خالص تفکیک شده است و علی رغم وجود تولید کننده منیزیم خالص در کشور و نبود

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶. آمار واردات مجموع محصولات منیزیم بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۵ بر اساس آمار منتشر شده توسط اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی تهران بر اساس (الف) ارزش واردات منیزیم و (ب) وزن [۶۹].

تولید کننده آلیاژهای منیزیم حقوق ورودی برای هر دو نوع شمش ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به کمتر بودن تعرفه ورودی قطعات ساخته شده نسبت به شمش اولیه تفاوت تعرفه عملاً حمایت وزارت صمت از تولید کننده خارجی را نشان می‌دهد.

در شکل۶ میزان واردات منیزیم در سال‌های اخیر بر حسب ارزش (شکل ۶-الف) و بر حسب وزن (شکل ۶-ب) نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، باوجود رشد متوسط، در طول ۲۰ سال گذشته، واردات این فلز با افت و خیزهای شدیدی همراه بوده است. با دقت در نمودار مشخص می‌شود که این روند متناوباً در دوره‌های ۲ تا ۳ ساله تکرار شده است. به نظر می‌رسد این روند نشان دهنده یکی از دو حالت زیر در بازار منیزیم ایران باشد:

- تمایل واردکنندگان عمده به تهیه نیاز دو یا چند سال باخرید یک محموله
- عدم شفافیت، نا آگاهی و پیش‌بینی نادرست از بازار منیزیم سبب اقبال کاذب به رشد در سال اول و سرخوردگی از عدم تقاضا در سال‌های بعد متناوباً گریبانگیر واردکنندگان بوده است.

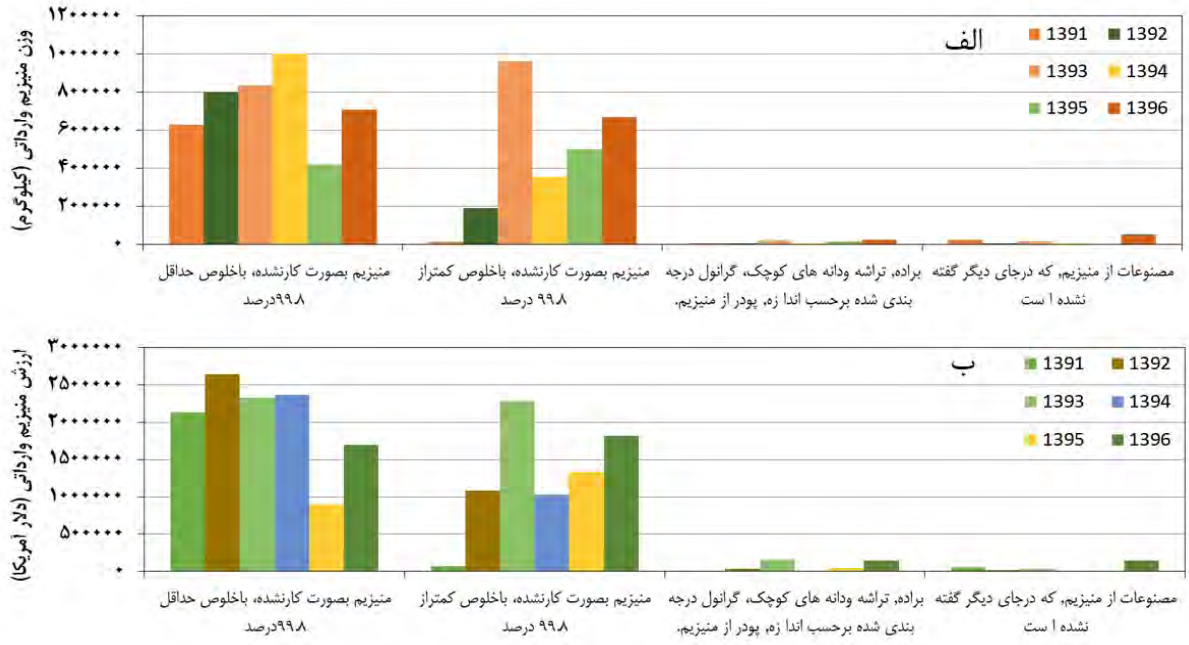
دسته‌بندی انواع منیزیم وارداتی به کشور بر حسب وزن و ارزش به ترتیب در نمودارهای (شکل ۷-الف و ب) نشان داده شده است [۶۹]. آمار منتشر شده گمرک نشان می‌دهد که بیشترین وزن واردات را منیزیم خالص به خود اختصاص داده است. پس از منیزیم خالص، آلیاژهای منیزیم (منیزیم کارنشده با خلوص کمتر از ۹۹/۸ درصد) در رتبه دوم و سپس مصنوعات در رتبه سوم قرار دارند (میله، ورق، پروفیل، قطعات ساخته شده و ...). این آمار نشان می‌دهد که بیشترین مصرف منیزیم مربوط به صنایع تولید آلومینیوم آلیاژی در رتبه نخست و تولید فروسیلیکومنیزیم در رتبه دوم بوده است. به عنوان مثال در سال ۱۳۹۶، حدود ۷۰۷۳۲۲ کیلوگرم منیزیم خالص معادل۱۶۹۳۴۴۶ دلار، ۴۹% از کل واردات منیزیم به کشور را تشکیل داده است در هر دو این صنایع منیزیم خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین اطلاعات نشان می‌دهد که مصرف شمش‌های منیزیم آلیاژی به سختی به یک ششم شمش خالص می‌رسد. دسته آخر محصولات وارداتی منیزیم یعنی براده‌ها و تراشه‌ها از نظر وزنی کمترین واردات را به خود اختصاص داده‌اند. با این وجود قیمت این دسته نسبت به سایر گروه‌ها بالاتر است.

تفکیک آمار واردات منیزیم در ایران بر اساس نوع منیزیم و کشور مبدا در سال ۱۳۹۶ به ترتیب در (شکل ۸– الف و ب) نشان داده شده است. (شکل ۸-الف) همه انواع منیزیم وارداتی به جز منیزیم خالص ۵۱% سهم واردات را در سال ۱۳۹۶ به خود اختصاص داده اند. همان‌طور که در (شکل ۸-ب) نشان داده شده است اکثر منیزیم وارداتی به کشور از چین تامین شده است. سایر کشورهای تامین‌کننده منیزیم کشور یا این محصول را بصورت صادرات مجدد به ایران فروخته‌اند یا سهم آن‌ها از صادرات به ایران مربوط به آلیاژهای منیزیم و یا مصنوعات ساخته شده از آن می‌باشد.

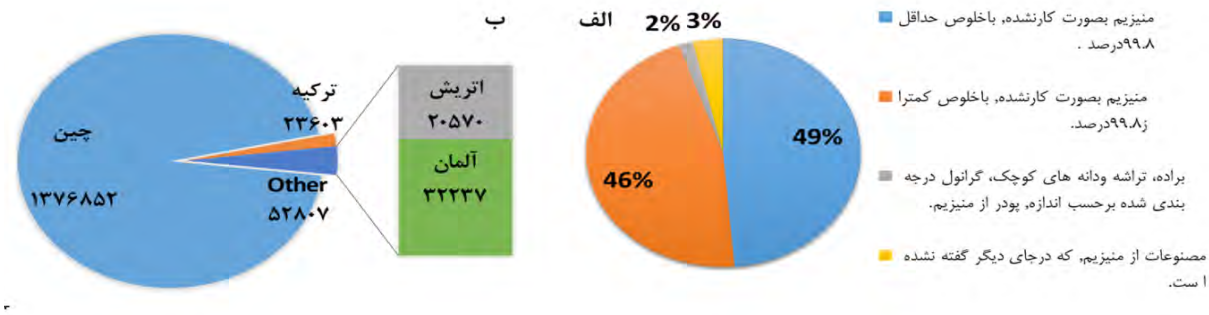
با شروع تولید داخلی منیزیم، از سال ۱۳۹۵ تعرفه واردات علیه منیزیم خالص و آلیاژی وضع شده و عوارض ورود آن از ۴ به ۱۰درصد افزایش پیدا کرده است. با لحاظ این تعرفه قیمت منیزیم داخلی نسبت به مشابه خارجی رقابتی تر شده است. لازم به تاکید است که علاوه بر تفاوت قیمت منیزیم داخلی و خارجی پارامترهای دیگری نیز مصرف کنندگان

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. آمار تفکیکی واردات منیزیم در ۵ سال منتهی به ۱۳۹۶ بر اساس (الف) وزن و (ب) ارزش واردات منیزیم [۶۹].



شکل ۸. (الف) نسبت انواع مختلف منیزیم در سال ۱۳۹۶ و (ب) نسبت واردات محصولات منیزیمی از کشورهای مختلف [۶۹].

داخلی را به خرید از داخل ترقیب نموده است. از جمله این پارامترها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- عدم نیاز به انتقال پول بین المللی از طریق صرافی و یا بانک‌ها برای خرید منیزیم از داخل
۲- عدم احتیاج به پرداخت پول پیش و معطلی دو ماهه پول برای خرید از چین
۳- تحویل فوری کالای خریداری شده
۴- عدم نیاز به پیگیری فرآیندهای گمرگی، حمل، بیمه و ...
۵- امکان مرجوع نمودن کالا در صورت متناسب نبودن محصول با نیازهای مشتری.

با لحاظ جمیع موارد بالا، تجربه نشان می‌دهد مصرف کنندگان داخلی ترجیح می‌دهند که از شمش منیزیم خالص تولید داخل به جای محصول چینی استفاده نمایند. مشابه این برخورد کالای چینی و ایرانی برای آلومینیوم و فروسیلیسم نیز وجود دارد. با وجود اختلاف قیمت بالای محصولات چینی نسبت به مشابه داخلی این محصولات کسر عمده‌ای از بازار داخلی را به خود اختصاص نداده اند.

۶. صنایع پایین دستی منیزیم در ایران

مصرف منیزیم و کاربردهای آن در صنعت به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند، کاربردهای متالورژیکی و کاربردهای سازه‌ای. درکاربردهای متالورژیکی منیزیم در طول فرآیند تولید و طی واکنش‌های فیزیکی یا شیمیایی مصرف می‌شود. این در حالی است که در کاربردهای سازه ای قطعه ای از جنس منیزیم و یا آلیاژهای آن جهت تحمل نیروهای مکانیکی ساخته می‌شود. در ادامه انواع کاربردهای منیزیم در صنایع ایران به تفکیک کاربردهای متالورژیکی و سازه ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطابق آمار [۷۰]، میزان تولید منیزیم در دنیا حدود یک میلیون تن می‌باشد، که

www.SID.ir

Archive of SID

حدود ۶۰ درصد این میزان مصرف متالورژیکی و ۴۰ درصد آن مصرف سازه‌ای دارد. البته این نسبت در حال تغییر است و همزمان با افزایش تحقیقات و بررسی‌های متعددی که به منظور رفع مشکلات تکنولوژیکی استفاده از منیزیم صورت گرفته است، میزان مصرف سازه‌ای منیزیم در دنیا در حال افزایش می‌باشد و بیشترین میزان مصرف سازه‌ای منیزیم در صنعت خودروسازی و به منظور ساخت قطعات سبک‌تر می‌باشد[۷۱].

کاربردهای متالورژیکی منیزیم در صنایع ایران

از مهم‌ترین این کاربردهای متالورژیکی منیزیم می‌توان به استفاده از این فلز جهت تهیه آلیاژهای آلومینیوم اشاره نمود، در آلیاژهای شکل‌پذیر سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ آلومینیوم و بسیاری از آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم، که امروزه به وفور از آن‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌شود، بین ۰٫۱ تا ۵ منیزیم مصرف می‌گردد. با توجه به حجم بالای تولید این دسته از آلیاژها و کاربرد وسیع آن‌ها در داخل کشور، می‌توان حجم بالای منیزیم مصرف شده طی فرآیند آلیاژسازی آلومینیوم را پیش‌بینی نمود. منیزیم برای این کاربرد بیشتر توسط شرکت‌های بزرگ تولید کننده محصولات میانی آلومینیومی مانند تولیدکنندگان شمش‌های آلیاژی، بیلت‌های اکستروژن و ورق‌های نوردی مصرف می‌شود. کارگاه‌های کوچک و متوسط ریخته‌گری نیز از شمش‌های منیزیم برای آلیاژسازی استفاده می‌نمایند[۷۲].

کاربرد دیگر متالورژیکی منیزیم، گوگردزدایی از مذاب فولاد است. فناوری استفاده از ذرات منیزیم برای گوگردزدایی از اهمیت بالایی در دنیا برخوردار است. منیزیم در دمای ذوب فولاد به شکل بخار است، در نتیجه این ویژگی فرآیند گوگردزدایی می‌تواند به صورت بسیار موثری صورت می‌پذیرد و حجم سرباره را به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد، که این امر سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در مصرف مواد و انرژی می‌شود و همچنین آسیب کمتری به نسوزها وارد می‌گردد. برای کارخانه‌هایی که در آن‌ها میزان گوگرد فولاد بالاست (مانند کارخانجاتی که از کک در کوره بلند استفاده می‌نمایند) گوگردزدایی با منیزیم بسیار به صرفه‌تر از آهک و کاربید می‌باشد[۷۲]، [۷۳].

کاربرد بعدی متالورژیکی منیزیم، استفاده از منیزیم به منظور احیای فلزات دیگر مانند تیتانیوم و یا زیرکونیوم می‌باشد. همانطور که قبلا به آن اشاره شد تولید زیرکونیوم هم اکنون در صنایع انرژی هسته ای کشور در حال تولید است اما استفاده از منیزیم به منظور تولید تیتانیوم کاربردی تاکنون در داخل کشور پیدا نکرده است. از جمله کاربردهای مهم دیگر منیزیم استفاده از آن به عنوان الکترود حفاظت کاتدی به منظور محافظت از خوردگی می‌باشد[۷۳]، [۷۴]. این کاربرد از منیزیم در داخل کشور توسعه یافته است. از این الکترودها در صنایع مختلف مثل صنعت نفت، گاز و پتروشیمی. بنا بر اطلاعات مولفان، حداقل ۵ شرکت در ایران منیزیم را به عنوان آند حفاظت کاتدی ریخته‌گری می‌نمایند.

علاوه بر موارد فوق، کاربردهای متالورژیکی متعدد دیگری نیز برای منیزیم در کشور وجود دارد. با این وجود حجم مصرف منیزیم در آن‌ها در مقایسه با موارد بالا بسیار پایین‌تر است. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از پودر منیزیم به منظور ساخت الکترودهای مختلف جوشکاری و همچنین انواع فلاکس‌ها اشاره کرد[۷۳]، [۷۴]، [۷۵].

کاربردهای سازه‌ای منیزیم در صنایع ایران

کاربردهای سازه‌ای از منیزیم به منظور ساخت قطعاتی با قابلیت تحمل نیرو استفاده می‌شود. این دسته از قطعات در دنیا در صنایع مختلف به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مجموع استفاده از منیزیم در قطعاتی که کاهش وزن و نسبت استحکام به وزن بالا حائز اهمیت است از جذابیت بسیار بالایی برخوردار است. یکی از مهمترین صنایع که در دنیا بیشترین میزان مصرف منیزیم را دارند، صنعت خودروسازی است[۷۶]، [۷۷]، [۷۸]. بدین ترتیب که از منیزیم در قسمت‌هایی از خودرو که میزان استحکام در دمای بالا احتیاج نمی‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی ناهمسانگرد و ساختار کریستالی هگزاگونال منیزیم سبب شده است که منیزیم طی فرآیندهای شکل‌دهی با محدودیت‌هایی همراه باشد، به همین دلیل در ساخت قطعات پیچیده صنعتی اصولا روش ریخته‌گری به روش‌های شکل‌دهی ترجیح داده می‌شود[۷۹]، [۸۰]. یکی از رایج‌ترین روش‌های ریخته‌گری، ریخته‌گری دایکست می‌باشد، در این روش ریخته‌گری تماس مذاب با هوا کاملا کنترل شده است و از سوختن و اکسیداسیون بیش از حد منیزیم جلوگیری به عمل می‌آید. بنابراین در صنعت خودرو به منظور ساخت قطعاتی که احتیاج به تحمل نیروی بالا و استحکام بالا ندارند، منیزیم توانسته است به مقدار زیادی توسعه یابد و همچنین جایگاه ویژه‌ای در شرکت‌های مختلف خودروسازی در دنیا به دست آورد. از جمله این قطعات می‌توان به درپوش‌های موتور، پوسته گیربکس و دیفرانسیل، قطعات پنل ابزار و غیره اشاره نمود. تکنولوژی‌های جدیدتر این توانایی را به دست آورده‌اند تا مشکلات و محدودیت‌های منیزیم را بر طرف و امکان ساخت قطعات پیشرفته‌تری را فراهم نمایند، در ایران نیز دو شرکت دایکاست مشغول تولید قطعات خودرو (غربیلک فرمان) می‌باشند[۸۱]، [۸۲]. علاوه بر این شرکت‌ها یک شرکت تجهیزات ریخته‌گری کم فشار منیزیم را در اختیار داشته و برای صنایع هوایی قطعات سازه‌ای منیزیمی تولید می‌نماید. به نظر می‌رسد تعداد بیشتری از شرکت‌های ریخته‌گری آلومینیوم نسبت به ریخته‌گری منیزیم نیز اقدام نموده‌اند. در اکثر آن‌ها به دلیل ملاحظات ایمنی ریخته‌گری منیزیم وارد فعالیت‌های روزمره نشده است[۸۳]، [۸۴].

www.SID.ir

Archive of SID

علاوه بر قطعات ریخته‌گری که در صنعت خودرو استفاده می‌شوند قطعات فرم داده شده منیزیم نیز می‌توانند در صنعت پرکاربرد باشند، اما متاسفانه استفاده از این قطعات در ایران توسعه چندانی پیدا نکرده است[۸۵]. از جمله این قطعات انواع مقاطع اکسترود شده می‌باشد که کاربردهای بسیار گسترده‌ای در بخش‌های مختلف می‌توانند داشته باشند[۸۶]، [۸۷]. تقریبا می‌توان گفت در هر کارخانه‌ای که آلومینیوم اکسترود می‌شود می‌توان با ایجاد تغییرات کوچکی در قالب‌های اکستروژن، منیزیم هم اکسترود نمود. علی‌رغم اینکه شرکت‌هایی زیادی در ایران اکستروژن آلومینیوم انجام می‌دهند، متاسفانه اکستروژن منیزیم در کشور توسعه چندانی نیافته است، دلیل اصلی این عدم توسعه این است که بیلت اولیه این منیزیم‌ها در ایران تولید نمی‌شود و روش ریخته‌گری سرمایش مستقیم یا اصطلاحا (DC Casting) یا(Magnesium Direct Chill Casting)در ایران وجود ندارد و واردات منیزیم به دلیل کاربردهای چندگانه آن همیشه با محدودیت‌های زیادی مواجه بوده است.

کاربردهای سازه‌ای آلیاژهای منیزیم در صنایع مختلف بسیار متعدد می‌باشند. یکی از این صنایع، صنعت روشنایی می‌باشد که می‌توان از منیزیم‌ها با گرید پایین‌تر برای تولید انواع کیس‌های روشنایی، قاب لامپ‌های هالوژن و غیره استفاده نمود، چرا که منیزیم هم سیالیت بالاتری نسبت به آلومینیوم دارد، بنابراین می‌توان پره‌های نازک‌تری را با استفاد از منیزیم تهیه کرد و همچنین گرمای ویژه بالاتری نسبت به آلومینیوم دارد، یعنی برای افزایش یک درجه سانتی‌گراد دما، منیزیم بایستی انرژی بیشتری نسبت به آلومینیوم جذب کند، که این ویژگی‌های خاص منیزیم سبب شده است که در این دسته از کاربردها جذابیت بیشتری نسبت به آلومینیوم داشته باشد[۸۸]. به طور کلی توسعه صنعت منیزیم نسبت به آلومینیوم در ایران بسیار محدوتر است و از دلایل اصلی و مهم این امر، عدم قطعیت در تامین منیزیم از خارج از کشور می‌باشد. امید است در سال‌های آینده با توجه به گستردگی تولید منیزیم در ایران و همچنین افزایش میزان تولید و توسعه آلیاژها و همچنین بازیافت آنها، صنعت پایین دستی منیزیم هم در کشورمان رشد قابل توجهی داشته باشد.

۷. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر پس از معرفی روش‌های تولید منیزیم و بررسی مولفه‌های عرضه و تقاضا مزایا و تهدیدات این صنعت گرداوری شده است. سپس ابعاد و ویژگی‌های صنعت منیزیم در ایران معرفی و مورد بررسی قرار گرفته است. مهمترین یافته‌های این مطالعه عبارت اند از:

۱- مزیت‌های تولید منیزیم اولیه در کشور عبارت اند از: (الف) فراوانی سنگ‌های دولومیتی مناسب برای تولید منیزیم، (ب) دسترسی آسان به انرژی گاز طبیعی، (ج) فرآیند تولید منیزیم به روش سیلیکوترمی ازلحاظ تولید آلودگی و مصرف آب، دوستدار محیطزیست می‌باشد، (د) فرآیند تولید منیزیم به نیروی کار ارزان نیاز داشته و از این رو برای ایجاد اشتغال بسیار مناسب است. (ح) حجم سرمایه گذاری برای تولید منیزیم درمقایسه باتولید سایر فلزات به مراتب پایین‌تر است و نهایتاً (و) کارخانه تولید منیزیم قابلیت تفکیک به اجزا منفک با سرمایه‌گذاری پایین‌تر را دارد.

۲- تهدیدات اصلی تولید منیزیم اولیه در ایران عبارت اند از: (الف) احتمال ناتوانی در تامین فروسیلیسم باخلوص و قیمت مناسب، (ب) ناتوانی در تامین دولومیت باویژگی‌های مناسب و (ج) ناتوانی در تامین و مدیریت سرمایه درگردش بسیار بالا. به نظر می‌رسد در برخی از طرح‌های مصوب تولید منیزیم در ایران این تهدیدات در نظر گرفته نشده است و احتمال شکست آن‌ها در مراحل اولیه بالا می‌باشد.

۳- آمار واردات منیزیم در ۱۰ سال اخیر نشان دهنده توسعه قابل توجه تقاضای این فلز در داخل کشور می‌باشد. به نظر می‌رسد با راه اندازی کارخانه‌های تولید منیزیم اولیه و حصول اطمینان از تامین قابل اعتماد این فلز در داخل کشور صنایع پایین دستی نیز یک به یک فعال شده و تقاضای بیشتری برای منیزیم ایجاد شود.

۴- همگام با شرایط بازارهای بین المللی در ایران نیز تقاضا برای استفاده از منیزیم در کاربردهای متالورژیکی بیشتر از کاربردهای سازه‌ای آن است. در بازارهای بین‌المللی صنعت خودرو موتور محرک افزایش تقاضا برای کاربردهای سازه‌ای منیزیم می‌باشد. رشد این دسته از کاربردهای منیزیم در ایران (کاربردهای سازه ای) منوط به توسعه خودروسازی و ورود قطعات نوین منیزیمی به سبد تولید قطعه سازان کشور می‌باشد.

www.SID.ir

References

[1] Company(IRALCO) IA. شرکت آلومینیوم ایران (ایرالکو) [Internet]. Available from: http://new.iralco.ir/index.aspx?lang=1&sub=0

[2] Liu M, Shih DS, Parish C, Atrens A. The Ignition Temperature of Mg Alloys WE43, AZ31 and AZ91. Corrosion Science [Internet]. 2012;54(1):139–42. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2011.09.004

[3] Gulbransen LB, Lewis JR, Hamilton H. Ignition Temperatures of Magnesium and Magnesium Alloys. Journal of Metals. 1951;523.

[4] Zhu C-G, Wang H-Z, Min L. Ignition Temperature of Magnesium Powder and Pyrotechnic Composition. Journal of Energetic Materials [Internet]. 2014;32(3):219–26. Available from: https://doi.org/10.1080/07370652.2013.812162

[5] Czerwinski F. Overcoming barriers of magnesium ignition and flammability. Advanced Materials and Processes. 2014;172(5):28–31.

[6] Sadeghi A, Pekguleryuz M. Recrystallization and texture evolution of Mg-3%Al-1%Zn-(0.4-0.8)%Sr alloys during extrusion. Materials Science and Engineering A [Internet]. 2011;528(3):1678–85. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.096

[7] محمدی، س، صادقی م، صادقی ع. مطالعه ای بر جایگاه آلیاژهای منیزیم در صنعت خودرو. In: پنجمین همایش سالانه بین المللی صنعت خودرو ایران. تهران: IAIIC2018; ۱۳۹۶.

[8] U.S. Geological Survey, 2019, Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey, 200 p., https://doi.org/10.3133/70202434

[9] Web of Science - Clarivate [Internet]. Available from: https://clarivate.com/products/web-of-science/?utm_source=adwords&utm_medium=paid&utm_campaign=SAR_Products_PPC_SAR_2018&gclid=EAIaIQobChMI8o7WmKqy3QIV1UkYCh2BRQifEAAYASAAEgKkRPD_BwE

[10] Stalmann A, Sebastian W, Friedrich H, Schumann S, Dröder K. Properties and processing of magnesium wrought products for automotive applications. Advanced Engineering Materials. 2001;3(12):969–74.

[11] Andure M.W., Jirapure S.C. DLP. Advance Automobile Material for Light Weight Future – A Review. International Conference on Benchmarks in Engineering Science and Technology ICBEST 2012 Proceedings published by International Journal of Computer Applications® (IJCA). 2012;15–22.

[12] E RZZ, Wiel JW Van Der. Future of Automotive Design & Materials Trends and Developments in Design and Materials. 2008;

[13] Gray Kards. Magnesium Car Parts: Cost Factors (Part 2) | Engineering360 [Internet]. IEEE Globalspace. 2017. Available from: https://insights.globalspec.com/article/7250/magnesium-car-parts-cost-factors-part-2

[14] Manuel M V., Singh A, Alderman M, Neelameggham NR, 2015. The Application of Magnesium alloys in Aircraft Interiors – Changing the Rules, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).

[15] GM Greener Vehicles. GM Pioneers Use of Lightweight Magnesium Sheet Metal [Internet]. Available from: https://3blmedia.com/News/GM-Pioneers-Use-Lightweight-Magnesium-Sheet-Metal

[16] Ghali E. Corrosion resistance of Aluminium and Magnesium alloys, 2010. A JOHN WILEY & SONS;

[17] شیبانی س, عطایی ا, حشمتی منش س, خیاطی غ. بررسی تاثیر پارامترهای مهم بر فرآیند تولید منیزیم از دولومیت کلسینه شده با روش احیا سیلیکوترمی تحت خلاء. In: دهمین کنگره سالانه انجمن مهندسین متالورژی ایران [Internet]. انجمن مهندسین متالورژی ایران; ۱۳۸۵. Available from: https://www.civilica.com/Paper-CIMS10-CIMS10_026.html

[18] Sivrikaya O. A study on the physicochemical and thermal characterisation of dolomite and limestone samples for use in ironmaking and steelmaking. Ironmaking & Steelmaking [Internet]. 2017;0(0):1–9. Available from: https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1337264

[19] Morsi IM, Ali HH. Start-up Slags for Producing Magnesium from Dolomite Ore in a Magnethermic Reactor. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013;113(6):511–7.

[20] Mordike F. Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications. 2006.

[21] Wulandari W, Brooks GA, Rhamdhani M a, Monaghan BJ. Magnesium : Current and Alternative Production Routes. Chemeca 2010: Engineering at the Edge; 26-29 September 2010, Hilton Adelaide, South Australia. 2008;347.

[22] John H. Rizley, Nils Høy-Petersen. Encyclopædia Britannica [Internet]. Encyclopædia Britannica, inc. . 2018. Available from: https://www.britannica.com/technology/magnesium-processing

[23] Kipouros GJ, Sadoway DR. The Chemistry and Electrochemistry of Magnesium Production. Elsevier. 1987;6:127–209.

[24] Ehrenberger SI, Schmid SA, Song S, Friedrich HE. Status and Potentials of Magnesium Production in China: Life Cycle Analysis Focussing on CO2 Emissions. 65th Annual World Magnesium Conference, Warsaw, Poland, May [Internet]. 2008;18–20. Available from: http://elib.dlr.de/54721/01/IMA-Paper_DLR-Ehrenberger-Schmid_Mg-production-in-China_LCA-CO2eq-emissions_080317.pdf

[25] Simandl G, Schultes H, Simandl J, Paradis S. Magnesium - Raw Materials, Metal Extraction and Economics -Global Picture. Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, Dublin 2007.

[26] Ramakrishnan S, Koltun P. Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process. Resources, Conservation and Recycling. 2004;42(1):49–64.

[27] Kramer DA. Magnesium Compounds. Outlook. 2003;2005:1–10.

[28] River G, Plant M, Huayuan N, Group M, Ding W. The Pidgeon Process in China and its Future. Magnesium Technology. 2000;113–4.

[29] Magnesium Overview | China Magnesium Corporation [Internet]. 2011. Available from: http://www.chinamagnesium-corporation.com/our-business/magnesium-overview

[30] Schoukens AFS, Abdellatif M, Freeman MJ. Technological breakthrough of the Mintek thermal magnesium process. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2006;106(1):25–9.

[31] Li RB, Zhang SJ, Guo LJ, Wei JJ. Numerical study of magnesium (Mg) production by the Pidgeon process: Impact of heat transfer on Mg reduction process. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013;59(1):328–37.

[32] Cherubini F, Raugei M, Ulgiati S. LCA of magnesium production. Technological overview and worldwide estimation of environmental burdens. Resources, Conservation and Recycling. 2008;52(8–9):1093–100.

www.SID.ir

Archive of SID

[33] Chen L-D. Study on the Reduction Jar Used for Mg Making. FOUNDRY TECHNOLOGY. 2002;23:124–8.

[34] Shahraki BK, Mehrabi B, Dabiri R. Thermal behavior of Zefreh dolomite mine (Centeral Iran). Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy. 2009;45(1):35–44.

[35] Winand R, Gysel M Van, Fontana A, Segers L. Production of Magnesium by Vacuum Carbothermic reduction of Calcined Dolomite. Mining and Metallurgy. 2000;

[36] GAO F, NIE Z ren, WANG Z hong, GONG X zheng, ZUO T yong. Assessing environmental impact of magnesium production using Pidgeon process in China. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2008;18(3):749–54.

[37] Shahheidari M, Sadeghi A, Sadeghi MH. High Temperature Creep Failure in Magnesium Reduction Retorts. Engineering Failure Analysis [Internet]. 2018;94(May):438–46. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630718305521

[38] Mehrabi B, Abdellatif M, Masoudi F. Magnesium production from asian ABE-GARM dolomite in pidgeon-type reactor. Iranian Journal of Materials Science and Engineering. 2011;8(2):18–24.

[39] Mehdi Kashmiri. Iran Joins Top Five Countries Producing Magnesium - Mehr News Agency [Internet]. Mehr Newa Agency. 2014. Available from: https://en.mehrnews.com/news/102877/Iran-joins-top-five-countries-producing-magnesium

[۴۰] بهادری ب. پتانسیل‌های کشور برای تبدیل شدن به قطب تولید فلز منیزیم در جهان به عنوان یک محصول صادرات محور. مرکز پژوهش‌ها مجلس شورای اسلامی. ۱۳۹۶

[41] Aslani S, Hashemi HRSB, Arianpour F. Beneficiation of Iranian Magnesite Ores by Reverse Flotation Process and its Effects on Shaped and Unshaped Refractories Properties. Bulletin of Materials Science. 2010;33(6):697–705.

[42] FinancialTribune. Iran's Untapped Potential for Magnesium Production | Financial Tribune [Internet]. 2018. Available from: https://financialtribune.com/articles/economy-business-and-markets/80885/iran-s-untapped-potential-for-magnesium-production

[43] MGT Mineral. Iran Dolomite Producer, Supplier and Exporter [Internet]. Available from: http://www.mgtmineral.com/index.php/minerals/dolomite

[44] Khaki M. ثروتی هنگفت به نام دولومیت[Internet]. 1394-04-08. Available from: https://www.farsnews.com/news/13940329000643/%D8%AB%D8%B1%D9%88%D8%AA%DB%8C-%D9%87%D9%86%DA%AF%D9%81%D8%AA-%D8%A8%D9%87-%D9%86%D8%A7%D9%85-%D8%AF%D9%88%D9%84%D9%88%D9%85%-DB%8C%D8%AA

[45] Dollimore D, Dunn JG, Lee YF, Penrod BM. The Decrepitation of Dolomite and Limestone. Thermochimica Acta. 1994;237(1):125–31.

[46] Kogel JE, Trivedi NC, Barker JM, Krukowski ST. Industrial Minerals and Rocks. Society for Minning, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME); 2006. 1003-1009 p.

[47] Karbasiyan M. درصد افزایش می‌یابد 70 میزان تولید آلومینیوم ایران [Internet].1397-02-06. Available from: http://madan24.com/1397/02/06/افزا-درصد-70-ایران-آلومینیوم-تولید-میزان/

[48] Hu W, Feng N, Wang Y, Wang Z. Magnesium Production by Vacuum Aluminothermic Reduction of a Mixture of Calcined Dolomite and Calcined Magnesite. 2011;121–2.

[49] Salazar K, Kimball SM. Mineral Commodity Summaries 2009. USGS. 2009;

[50] Esan . Magnesium, Metal of the Future [Internet]. 2015.Available from: http://www.esanmagnezyum.com/en/index.html

[51] Das S. Primary Magnesium Production Costs for Automotive Applications. Jom. 2008;60(11):63–9.

[52] Zuliani DJ, Reeson D. Making Magnesium a More Cost and Environmentally Competitive Option. Mg2012: 9th International Conference on Magnesium alloys and their Applications. 2012;21–30.

[53] Simandl GJ, Irvine M, Simandl J. Primary magnesium industry at the crossroads? Light Metal Age. 2007;65(2).

[54] میزان مصرفی آب در تولید هر تن فولاد ۳۲ هزار لیتر آب . [Internet]. 1396-06-26. Available from: http://shoaresal.ir/fa/news/80653

[55] شرکت تیوا تجارت ماهان. یازده پیشنهاد مجلس برای توسعه تولید و بازار منیزیوم ایران [Internet]. 1396-12-26. Available from: http://tivamg.com/?p=28666

[56] M. porghasemi. چشم‌انداز روشن اما مشروط منیزیم ایران [Internet]. 02-10-1396. Available from: https://www.smtnews.ir/mine/mineral-industries/15421-

[57] بازار اینترنتی آهن آلات-تاریخچه . [Internet]. 1397-04-12. Available from: https://www.ahannama.ir/blog/view?title=شرکت فولاد مبارکه

[58] Lieberman MB. The Magnesium industry in Transition. Review of Industrial Organization. 2001;19(1):71–9.

[59] درگاه اطلاعات و خدمات صنعت معدن تجارت. بهین یاب [Internet]. Available from: http://www.behinyab.ir/?req=companys&subreq=investment#

[60] Mehrabi B, Abdellatif M, Masoudi F. Evaluation of Zefreh Dolomite(Central Iran) for production of Magnesium via the Pidgeon Process. Mineral Processing & Extractive Metall, 33: 316-326, 2012.

[61] Gao F, Nie Z, Wang Z, Gong X, Zuo T. Life cycle assessment of primary magnesium production using the Pidgeon process in China. International Journal of Life Cycle Assessment. 2009;14(5):480–9.

[62] Magnethermic Reactor. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013;113(6): 511–517.

[63] U.S. Geological Survey 2009. Mineral Commodity Summaries 2009 [Internet]. U.S. Geological Survey, 195 p.; Available from: https://www.google.com/search?source=hp&ei=o_VpW5DGFdCjmwXjpbTgAQ&q=mineral+commodity+summaries+2009&oq=MINERAL+COMMODITY+SUMMARIES+2009&gs_l=psy-ab.1.0.0i22i30k1l2.2344.2344.0.4909.1.1.0.0.0.0.232.232.2-1.1.0....0...1c.1.64.psy-ab..0.1.232....0.ISt9ESjN0

[64] Berry C. A Closer Look at Trumping. Acta Analytica [Internet]. 2015;30(1):41–57. Available from: http://link.springer.com/10.1007/s12136-014-0231-y

[65] Faramarz Kafi. تنها کارخانه شمش منیزیم خاورمیانه درگیر بی تدبیری‌ها و رانت‌ها [Internet]. 1394. Available from: http://www.dana.ir/news/447891.html/از ۷ کوره احیا فقط یک کوره فعال است / تنها-کارخانه-شمش-منیزیم-خاورمیانه-درگیر-ب%DB

[66] Habashizade.. درصد دست 99/99 ایران به فناوری تولید منیزیم با خلوص یافت [Internet]. 1383-10-09. [cited 2018 Aug 22]. Available from: https://www.isna.ir/news/8310-03837/انرژی-ZPP-مدیر-کارخانه-هسته-بی-اصفهان-ایران-به-فناوری-تولید

www.SID.ir

[67] Hamid Reza Matin. Iran will not need to import magnesium – Aramico Company [Internet]. Aramico. 2017. Available from: http://arami-co.com/2017/10/07/with-the-construction-of-a-magnesium-extraction-plant-in-hamadan-iran-will-need-to-import-magnesium/

[68] International Affairs and PR. Listing Magnesium Ingot from Middle East's Largest Producer by IME [Internet]. IME. 2016. Available from: http://en.ime.co.ir/ShowContent.html?i=bzBpUGhFaVgwNTQ9

[69] اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی تهران [Internet]. Available from: http://www.tccim.ir/ImpExpStats_TarrifCustomCountry.aspx?slcImpExp=Export&slcCountry=&sYear=1396&mode=doit

[70] . منیزیم؛ فلز آینده [Internet]. 1396-11-23. Available from: http://www.felezatonline.ir/News-2439/منیزیم؛-فلز-آینده?id=2439

[71] Mordike F. Magnesium Technology [Internet]. Vol. 1, Acta Materialia. 1996. 1-31 p. Available from: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&q=physical+metallurgy+cahn+haasen&btnG=Search&as_sdt=0,5&as_ylo=&as_vis=0#0

[72] Ghali E. Properties, Use, and Performance of Magnesium and Its Alloys. In: Propertis of Magnesium Alloys. p. 321–47.

[73] International Magnesium Association. Magnesium Applications [Internet]. Available from: https://www.intlmag.org/page/mg_applications_ima

[74] Polmear IJ. Magnesium alloys and applications. Materials Science and Technology [Internet]. 1994;10(1):1–16. Available from: http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/mst.1994.10.1.1

[75] Du J, Han W, Peng Y. Life Cycle Greenhouse Gases, Energy and Cost Assessment of Automobiles Using Magnesium from Chinese Pidgeon Process. Journal of Cleaner Production [Internet]. 2010;18(2):112–9. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.013

[76] Kulekci MK. Magnesium and its Alloys Applications in Automotive Industry. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;39(9–10):851–65.

[77] Joost WJ, Krajewski PE. Towards Magnesium alloys for High-Volume Automotive Applications. Scripta Materialia [Internet]. 2017;128:107–12. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.07.035

[78] Froes FH, Eliezer D, Aghion E. The Science , Technology , and Applications of Magnesium. 1998;(September).

[79] Madaj M, Greger M, Karas V. Magnesium-Alloy Die Forgings for Automotive Applications. Materiali in Tehnologije. 2015;49(2):267–73.

[80] Du CP, Xu DF. Application of Energy-Saving Magnesium Alloy in Automotive Industry. Advanced Materials Research [Internet]. 2013;734–737:2244–7. Available from: http://www.scientific.net/AMR.734-737.2244

[81] Niu XP, Skszek T, Fabischek M, Zak A. Low Temperature Warm Forming of Magnesium ZEK 100 Sheets for Automotive Applications. Thermec 2013. 2014;783:431–6.

[82] Wang SF, Hu WW, Gao ZH, Zhao TP. The application of magnesium alloy in automotive seat design. Applied Mechanics and Materials. 2013;395:266–70.

[83] Luo AA. Magnesium Casting Technology for Structural Applications. Journal of Magnesium and Alloys [Internet]. 2013;1(1):2–22. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.002

[84] Yoon J, Lee SI. Warm forging of magnesium AZ80 alloy for the control arm in an automobile. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2015;229(13):1732–8.

[85] Mao PL, Liu Z, Wang CY, Guo QY, Sun J, Wang F, et al. Fatigue behavior of magnesium alloy and application in auto steering wheel frame. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition) [Internet]. 2008;18(SPEC. ISSUE 1):s218–22. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60206-3

[86] Uematsu Y, Tokaji K, Kamakura M, Uchida K, Shibata H, Bekku N. Effect of extrusion conditions on grain refinement and fatigue behaviour in magnesium alloys. Materials Science and Engineering A. 2006;434(1–2):131–40.

[87] Blawert C, Hort N, Kainer KU. Automotive Applications of Magnesium and Its Alloys. Trans Indian Inst Met [Internet]. 2004;57(4):397–408. Available from: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-19244386270&partnerID=40

[88] Gupta M, Sharon NML. Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites. Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites. 2010.

www.SID.ir