

بررسی تأثیر نوع و درصد مواد اولیه بر روی خواص بدنه‌های کوراندوم-مولایتی

محمد حسین زاده^۱، رحیم نقی زاده^۲، کسری فراهانی^۳، سانویر سهاکیان^۳

^۱ شرکت نسوز مهرگداز،

^۲ دانشگاه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران،

^۳ معاونت مهندسی سازمان توسعه برق ایران

s.arabsarhangi@gmail.com

چکیده: بدنه‌های کوراندوم-مولایت در حوزه سرامیک‌های مهندسی و همچنین دیرگدازها بسیار مطرح می‌باشند. این بدنه‌ها استحکام گرم و مقاومت شوک حرارتی بالایی دارند و در محفظه احتراق توربین گازی تولید برق مصرف می‌گردند. هدف از این تحقیق طراحی فرمولاسیون بهینه برای رسیدن به خواص فوق بود. بدین منظور مواد اولیه مختلف شامل آلومینای تبولار، آندالوزیت، مولایت زیتتری و ذوبی به‌عنوان مواد اصلی و افزودنی‌های رس، آلومینای راکتیو و میکروسیلیس در فرمول‌های مختلف مورد ارزیابی از نظر خاصیت مهم مقاومت به شوک حرارتی در این کاربرد خاص قرار گرفتند. سپس فرمول بهینه از نظر خاصیت فوق انتخاب شد و مورد ارزیابی و مقایسه با یک نمونه خارجی از نظر خواص فیزیکی، مکانیکی سرد و گرم و خواص حرارتی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرمولاسیون حاوی ۴۲-۴۰ درصدوزنی مولایت ذوبی و ۶۰-۵۸ درصد وزنی آلومینای تبولار پس از پخت در 1700°C در اتمسفر معمولی بهترین نتیجه را از نظر مقاومت در برابر شوک حرارتی دارا می‌باشد. این بدنه از نظر استحکام خمشی سرد برابر 112MPa و استحکام خمشی گرم 1200°C ، 10MPa و ضریب انبساط حرارتی $1/10^{-6}$ در 1°C را داشت که نمایشگر خواص مناسبی در مقایسه با نمونه خارجی بود.

کلمات کلیدی: کوراندوم-مولایت، دیرگداز، توربین گازی، استحکام خمشی، مقاومت شوک حرارتی.

۱- مقدمه

مولایت دارای دیرگدازی بالا، سرعت خزش کم و پایداری شیمیایی و حرارتی خوب می‌باشد و تنها فاز کریستالین پایدار در اتمسفر معمولی در دمای اطاق و بالا در دیاکرام $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ می‌باشد [۱]. کوراندوم فازی با سختی بالا، مقاومت مکانیکی خوب در دمای بالا می‌باشد اما استحکام خمشی و تافنس پایینی دارد [۲و۳]. مولایت دارای نقطه ذوب 1830°C ، دانسیته تئوری $3/2\text{ g/cm}^3$ ، ضریب انبساط $1/10^{-6}$ در $4/5 \times 10^{-6}$ و آلومینا دارای نقطه ذوب 2050°C ، دانسیته تئوری $3/96\text{ g/cm}^3$ و ضریب انبساط حرارتی $1/10^{-6}$ در 8×10^{-6} می‌باشد [۴]. بنابراین با افزودن مولایت به آلومینا انتظار می‌رود که مقاومت شوک حرارتی بهبود یابد [۴]. مولایت را اغلب به‌صورت فرمول محلول جامد $\text{Al}_{4+2x}\text{Si}_{2-2x}\text{O}_{10-x}$ با $0/18 \leq x \leq 0/82$ در نظر می‌گیرند. مولایت استوکیومتریک یا مولایت ۳:۲ با $72\% \text{Al}_2\text{O}_3$ و با $x=0/25$ و مولایت ۲:۱ یا غنی از آلومینا با $78\% \text{Al}_2\text{O}_3$ و با $x=0/4$ از معروف‌ترین مولایت‌ها در محدوده فوق می‌باشند [۵]. مولایت استوکیومتری در اتمسفر اکسیدی پایداری بالایی دارد و در اتمسفر احیایی در بالای 1600°C شروع به تجزیه به مولایت غنی از آلومینا و سپس کوراندوم و فاز گازی SiO می‌کند [۵].

در دهه‌های گذشته کامپوزیت‌های چند فازی دیرگداز گسترش یافته است. در این کامپوزیت‌ها کنترل ریزساختار و تنظیم نسبت اجزا به‌منظور رسیدن به خواص مکانیکی و حرارتی مناسب مدنظر می‌باشد

[۳۶]. در این کامپوزیت‌ها افزودن مولایت، زیرکونیا، کربن، SiC و غیره مدنظر قرار گرفته است. Aksel [۷]، بر روی بهبود مقاومت شوک حرارتی و خواص مکانیکی دیرگدازهای آلومینا-مولایت مطالعه کرده و مشاهده کرده است که با افزودن ذرات مولایت ریزدانه استحکام و تافنس بهبود یافته است. Meng و همکارانش [۸]، بر روی تأثیر ویسکرها‌های مولایت بر بهبود تافنس شکست و همچنین پارامترهای دما و زمان سینتر بر روی استحکام خمشی بدنه‌های کوراندوم-مولایت مطالعه کرده است. با توجه به کاربرد دیرگدازهای کوراندوم-مولایت در اطاق احتراق نیروگاه‌های گازی مولد برق و با توجه به اهمیت خواصی مثل مقاومت شوک حرارتی در آن، در این تحقیق طراحی و ساخت و اندازه‌گیری این نوع دیرگدازها مدنظر قرار گرفت.

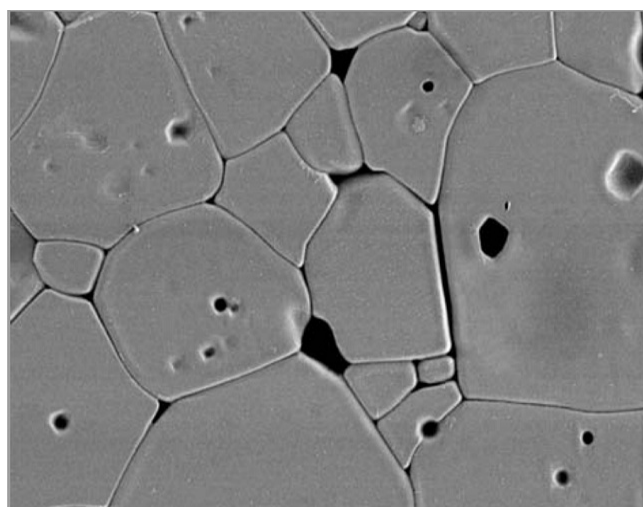
۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مصرفی در این تحقیق آلومینای تبولار، آندالوزیت، مولایت ذوبی، آلومینای راکتیو، میکروسیلیس و رس بود. آلومینای تبولار که از حرارتی دادن آلومینای آلفا در بالای 1800°C بدست می‌آید از شرکت Alcan با خلوص ۹۹/۷ تهیه شده بود و دارای مشخصات شیمیایی و فیزیکی ذکر شده در جدول ۱ بود. ریزساختار این ماده اولیه مطابق شکل ۱ بود و چهار دانه‌بندی تهیه شده آن مورد آنالیز قرار گرفت که دانه‌بندی جدول ۲ را داشت.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و خواص فیزیکی آلومینای تبولار از شرکت Alcan

مشخصات شیمیایی		خواص فیزیکی	
Na ₂ O	ppm	۲۷۰۰	دانسیتته ظاهری g/cm ³ ۳/۶۵
Fe ₂ O ₃	ppm	۳۰۰	دانسیتته بالک g/cm ³ ۳/۵۵
CaO	ppm	۲۰۰	تخلخل ظاهری % ۳
SiO ₂	ppm	۳۰۰	جذب آب % ۰/۹



شکل ۱- کریستال‌های اولیه کوراندوم در ریزساختار آلومینای تبولار از شرکت Alcan



جدول ۲-دانه‌بندی آلومینای تبولار

مش ۲۲۵ <math>< 45 \mu\text{m}</math>		مش ۲۸ <math>< 60 \mu\text{m}</math>		مش ۱۴-۲۸ $0.6-1/18 \text{ mm}$		مش ۸-۱۴ $2/36-1/18 \text{ mm}$	
Typical%	اندازه الک	Typical%	اندازه الک	Typical%	اندازه الک	Typical%	اندازه الک
۹۵	<math>< 45 \mu\text{m}</math>	۹۹/۵	<math>< 630 \mu\text{m}</math>	۹۹/۷	<math>< 1/18 \text{ mm}</math>	۹۹/۵	<math>< 2/36 \text{ mm}</math>
—	—	۸۵	<math>< 500 \mu\text{m}</math>	۷۵	<math>< 1 \text{ mm}</math>	۶۷	<math>< 2 \text{ mm}</math>
—	—	۷۰	<math>< 400 \mu\text{m}</math>	۴۲	<math>< 0.8 \text{ mm}</math>	۵۴	<math>< 1/7 \text{ mm}</math>
—	—	۵۵	<math>< 300 \mu\text{m}</math>	۱۰	<math>< 0.63 \text{ mm}</math>	۲۰	<math>< 1 \text{ mm}</math>
—	—	۴۰	<math>< 200 \mu\text{m}</math>	۰/۵	<math>< 0.5 \text{ mm}</math>	۲	<math>< 0.5 \text{ mm}</math>
—	—	۲۵	<math>< 100 \mu\text{m}</math>				

آندالوزیت مصرفی از شرکت Damrec فرانسه با نام تجری Durandal DS9 با آنالیز شیمیایی جدول ۳ و با دانه‌بندی جدول ۴ تهیه شد.

جدول ۳- آنالیز شیمیایی آندالوزیت مصرفی

LOI	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Typical %
۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱۵	۰/۷۵	۳۸/۹	۵۹/۱	

جدول ۴- دانه‌بندی آندالوزیت مصرفی در رنج ۰-۲mm

۲-۳/۳۵ mm	۱/۰-۲/۰ mm	۰/۰۷۵-۱ mm	۰/۰۷۵ mm
≤۱۰	۲۰-۴۰	۶۰-۸۰	≤۱۰

مولایت مصرفی از نوع مولایت ذوبی و زینتری از کشور چین شرکت Bokai Minerals بود. مولایت ذوبی با آنالیز شیمیایی جدول ۴ و با دو دانه‌بندی ۱-۲mm و ۰-۱mm و با الگوی پراش اشعه x شکل ۲ بوده است که دارای فاز اصلی مولایت و فاز جزئی کوراندوم بوده است. به نظر می‌رسد مقداری فاز آمورف نیز داشته باشد. آلومینای راکتیو که آلومینایی با فاز α و دانه‌بندی فوق العاده ریز می‌باشد، از شرکت Alcan با نام تجاری PFR20 تهیه شد. آنالیز شیمیایی، خواص فیزیکی و توزیع دانه‌بندی آن در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۵- آنالیز شیمیایی مولایت به روش XRF

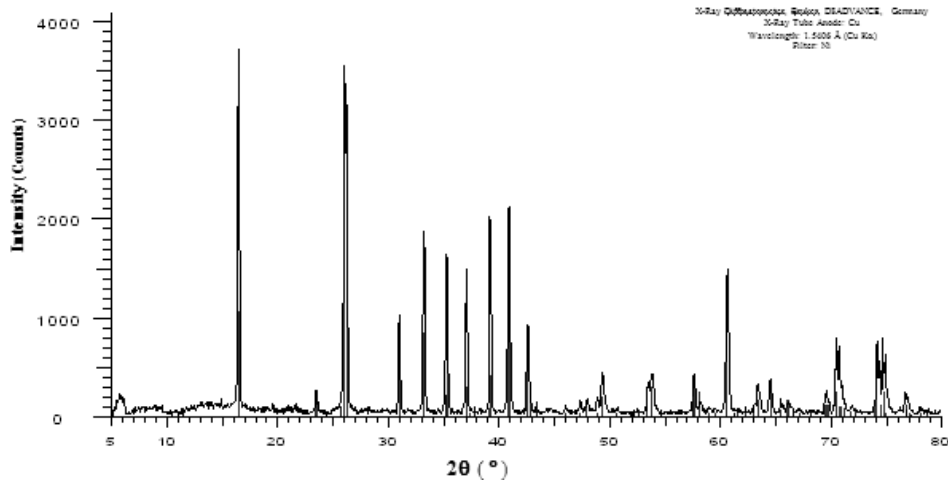
LOI	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	عناصر
-	-	۰/۰۲	۰/۲۴	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۲	۲۱/۹۴	۷۶/۷۰	درصد

جدول ۶- خواص فیزیکی، شیمیایی و دانه‌بندی PFR20

توزیع دانه‌بندی (μm)			خواص فیزیکی		
<math>< 16 \mu\text{m}</math>	<math>< 2 \mu\text{m}</math>	<math>< 0.5 \mu\text{m}</math>	سیالیت دوغاب (S)	جذب آب (ml/100g)	سطح ویژه (m ² /g)
۹۷/۵	۵۰	۱۰	۱۴	۱۷	۲/۱



Instrument Specifications

X-Ray Diffractometer: Seiko, DISADVANCE, Germany
X-Ray Tube Anode: Cu
Wavelength: 1.5406 Å (Cu Kα)
Filter: Ni

Sample Identification and Quantification

Line Color	Compound Name	Formula	JSP Number	Concentration (%W/W)
■	Alumina, 43%	Al ₂ Si ₂ O ₇	15-0776	90.2
■	Corundum, 53%	alpha-Al ₂ O ₃	46-1212	9.8

Date: 89/11/19
No.:

شکل ۲- الگوی پراش اشعه X مولایت ذوبی

میکروسیلیس که سیلیس تهیه شده از گرد و غبار کارخانجات تهیه محصولات فرومگنز و غیره می باشد از شرکت Elkem نروژ با شماره تجاری ۹۷۱ تهیه شد. مشخصات این ماده در جدول ۷ آورده شده است. این ماده آمورف و دارای ذرات کروی با قطر متوسط ۱۵ μm و سطح مخصوص ۲۰ m²/g می باشد.

جدول ۷- مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس مصرفی

مقدار	خواص
min	۹۷/۵ % SiO ₂
max	۰/۸ % C
max	۰/۳ % Fe ₂ O ₃
max	۰/۷ % Al ₂ O ₃
max	۰/۳ % CaO
max	۰/۵ % MgO
max	۰/۶ % K ₂ O
max	۰/۳ % Na ₂ O
max	۰/۱ % P ₂ O ₃
max	۰/۴ % SO ₃
max	۰/۱ % Cl
max	۰/۸ % H ₂ O
max	۱ % LOI
۰/۶	+۴۵ μm
۴/۵-۶/۵	pH
۳۰۰-۴۵۰	BD بسته بندی در حالت فشرده نشده kg/m ³
۵۰۰-۶۰۰	BD بسته بندی در حالت فشرده شده kg/m ³

رس مصرفی از شرکت Imerys فرانسه با نام تجاری RR40 تهیه شد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸- مشخصات رس PR40

آنالیز شیمیایی	
۵۵/۹	% SiO ₂
۳۸/۵	% Al ₂ O ₃
۲	% Fe ₂ O ₃
۲/۵	% TiO ₂
۰/۶	% CaO
۰/۱	% MgO
۰/۱	% Na ₂ O
۰/۱	% K ₂ O
۱۳	LOI
خواص فیزیکی	
۱۱۰	MOR (kg/m ²)
۱۷۶۰ (یا ۳۴/۳۵ مخروط زگر)	مخروط زگر (°C)
اندازه ذرات	
۰/۲	۵۰۰ μm
۶	۲۰۰ μm
۱۷	۱۰۰ μm
۲۷	۶۳ μm

۲-۲- روش آزمایش

برای رسیدن به بدنه کوراندوم-مولایتی دارای مقاومت شوک حرارتی بالا چهار دسته ترکیب مطابق جداول ۹ الی ۱۲ تهیه شد. فرمول‌های جدول ۹ بر اساس سه ماده اولیه مولایت زینتری، آلومینای تبولار و رس می‌باشد که بدنه حاصله دارای درصد‌های مختلف کوراندوم و مولایت پس از پخت خواهد بود. دانه‌بندی‌ها بر اساس رسیدن به فشردگی مطلوب انتخاب شدند و افزودنی رس هم کمک به شکل‌دهی و استحکام خام می‌کند و هم این که انتظار می‌رود در هنگام پخت مولایت بدست آید. بدنه‌های جدول ۱۰ بر اساس دو ماده اولیه آندالوزیت و آلومینای تبولار می‌باشد که پس از پخت از واکنش آندالوزیت با بخشی از آلومینا فاز مولایت حاصل خواهد شد. در جدول ۱۱ از هر دو مولایت زینتری و ذوبی استفاده شده است و در فرمول‌های جدول ۱۲ ارزیابی افزودنی آلومینای راکتیو و میکروسیلیس هدف انجام آزمایش بوده است. دانه‌بندی مواد اولیه مختلف طوری انتخاب شد که مجموع دانه‌بندی ۱-۲mm، ۰/۵-۱، ۰/۵، ۰/۵ و <۴۵ μm تقریباً در کلیه فرمول‌ها دارای تغییرات مختصر باشد و بتوان از تأثیر آن چشم‌پوشی کرد.

جدول ۹- فرمول‌های مبتنی بر مولایت زینتری، آلومینای تبولار و رس

کد نمونه							ماده اولیه
MsCL70	MsCL60	MsCL50	MsCL40	MsCL30	MsCL20	MsCL10	
۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	مولایت زینتری
۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	آلومینای تبولار
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	رس



مواد مختلف فرمولاسیون‌های مختلف پس از توزین در مخلوط‌کن آزمایشگاهی مخلوط شدند و چسب رزینی نوالاک (به جز فرمول‌های حاوی رس که رطوبت داشتند) به آنها افزوده شد. پس از ماندن مخلوط به مدت ۳ ساعت برای همگنی، مخلوط‌ها با پرس هیدرولیک Laeis آلمان و با فشار نهایی 1600 kgf/cm^2 به صورت آجرهای $228 \times 114 \times 64 \text{ mm}$ پرس شدند. پس از خشک شدن مخلوط‌های حاوی رس و حرارت دادن نمونه‌های بدون رس در 100°C به مدت ۲۴ ساعت، عملیات پخت در کوره شاتلی Ried Hammer آلمان با سرعت گرم کردن 10°C/mm و در دمای ماکزیمم 1600°C برای نمونه‌های رس و 1700°C برای بقیه نمونه‌ها انجام شد. پس از پخت کلیه نمونه‌های تحت شوک حرارتی از دمای 1000°C کوره الکتریکی به آب 20°C به تعداد ۳۰ سیکل قرار گرفتند و متوسط اندازه ترک‌های آشکار اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول ۱۳ آورده شده است. نمونه‌های جدول ۹ و ۱۰ پس از ده بار شوک سرشکن جزیی داشتند و از گوشه‌ها مقدار جزیی شکست مشاهده شد.

بنابراین این نمونه‌های حاوی رس و آندالوزیت از آزمایش‌های دیگر کنار گذاشته شدند. نمونه‌های جدول ۱۱ و ۱۲ تا ۳۰ بار شوک حرارتی را طی کردند که بدون سرشکن بوده است. از مابین این نمونه‌ها، نمونه‌های MF58 و MF60 بهترین نتایج را داشته‌اند که حاوی ۴۲-۴۰٪ مولایت ذوبی و ۵۸-۶۰٪ آلومینای تبلولار بودند. نمونه MF60 برای آزمایش‌های مختلف فیزیکی، استحکام و ضریب هدایت و انبساط حرارتی انتخاب شدند که نتایج آن در جدول ۱۴ با ذکر استاندارد انجام آزمایش آورده شده است.

جدول ۱۰- فرمول‌های مبتنی بر آندالوزیت و آلومینای تبلولار

کد نمونه	An30	An40	An50	An60	An70	An80	An90	ماده اولیه
	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	آندالوزیت
	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	کوراندوم

جدول ۱۱- فرمول‌های مبتنی بر مولایت ذوبی، زینتری و آلومینای تبلولار

کد نمونه	MF58	MF60	MF63	MF67	MF70	MS60	MS63	ماده اولیه
	۴۲	۴۰	۳۷	۳۳	۳۰	----	----	مولایت ذوبی
	----	----	----	----	----	۴۰	۳۷	مولایت زینتری
	۵۸	۶۰	۶۳	۶۷	۷۰	۶۰	۶۳	آلومینای تبلولار

جدول ۱۲- فرمول‌های حاوی افزودنی میکروسیلیس و آلومینای راکتیو

کد نمونه	MFSi70	MFSi75	MFRA53	ماده اولیه
	۲۵	۲۰	۳۷	مولایت ذوبی
	----	----	۵	آلومینای راکتیو
	۵	۵	----	میکروسیلیس
	۷۰	۷۵	۵۳	کوراندوم

جدول ۱۳- مقاومت به شوک حرارتی نمونه‌های مختلف پس از شوک حرارتی از 1000°C به آب 20°C
پس از ۳۰ سیکل شوک (اندازه طول ترک mm)

M _S C _L 70	M _S C _L 60	M _S C _L 50	M _S C _L 40	M _S C _L 30	M _S C _L 20	M _S C _L 10	کد نمونه
>۴۸mm	>۴۴mm	>۳۵mm	>۲۵mm	>۳۳mm	>۴۶mm	>۵۰mm	مقاومت به شوک حرارتی
An30	An40	An50	An60	An70	An80	An90	کد نمونه
>۳۹mm	>۳۱mm	>۲۵mm	>۱۰mm	>۱۸mm	>۳۴mm	>۵۵mm	مقاومت به شوک حرارتی
MF50	MF60	MF63	MF64	MF70	MS60	MS63	کد نمونه
>۲۷mm	>۲۵mm	>۲۹mm	>۳۰mm	>۳۴mm	>۳۳mm	>۳۰mm	مقاومت به شوک حرارتی
-	-	-	-	MFSi70	MFSi75	MFRA53	کد نمونه
-	-	-	-	>۳۸mm	>۳۷mm	>۳۰mm	مقاومت به شوک حرارتی

۳- نتایج و بحث

همان طور که نتایج شوک حرارتی نشان داد نمونه‌های حاوی رس (نمونه‌های جدول ۹)، نمونه‌های حاوی آندالوزیت (نمونه‌های جدول ۱۰) قبل از سی بار شوک حرارتی سرشکن جزئی شده‌اند که البته بدون سرشکن حالت ذکر شده در استاندارد BS و IS مبنی بر تحمل ۳۰ بار شوک را دارا بوده است ولی با این وجود کنار گذاشته شدند. در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد رس پس از پخت در دمای 1600°C ، رس تبدیل به مولایت، کوارتز (یا فازهای دیگر سیلیس) و آمورف می‌گردد [۹]. بدیهی است که این نمونه‌ها بیشترین درصد فاز آمورف را نسبت به نمونه‌های دیگر خواهند داشت. بنابراین با توجه به آزمایش‌های شوک حرارتی به نظر می‌رسد که فاز مولایت موثر در این بدنه‌ها تشکیل نشده است. فاز آمورف سیلیسی حاصله نیز می‌تواند با بخشی از کوراندوم موجود در آلومینای تبولار مولایت دهد. بنابراین نمونه‌ها نیز به همان دلیل وجود فاز آمورف زیاد می‌تواند حساس تر به شوک حرارتی باشد. البته وضعیت آن بهتر از نمونه‌های حاوی رس خواهد بود. در نمونه‌های حاوی مولایت زینتری و ذوبی و همچنین حاوی افزودنی میکروسیلیس و آلومینای راکتیو وضعیت مقاومت در برابر شوک حرارتی بسیار مطلوب بوده است زیرا که در کلیه این نمونه‌ها میزان فاز آمورف به دلیل میزان کم ناخالصی‌ها مطابق آنالیز شیمیایی مواد اولیه مربوطه کم می‌باشد. اما نکته مهم دیگر این می‌باشد که نمونه‌های حاوی مولایت ذوبی برخلاف تصور عمومی جواب بهتری را نسبت به بدنه‌های مولایت زینتری مطابق جدول ۱۳ از نظر شوک حرارتی داشته‌اند. پس از مطالعه شکل ذرات این نمونه‌ها مطابق شکل ۳ مشاهده گردید که در ذرات این مولایت تعداد قابل توجهی ذرات الیافی ریز وجود دارد بنابراین این ذرات الیافی به صورت کامپوزیت عمل کرده است.

نمونه‌های حاوی آلومینای راکتیو از نمونه‌های حاوی میکروسیلیس وضعیت بهتری را در مقاومت به شوک حرارتی داشته‌اند. به نظر می‌رسد که بخشی از فاز آمورف میکروسیلیس با واکنش با اجزای آلومینایی تبدیل به مولایت و بخش دیگر آن تبدیل به فازهای مختلف سیلیسی مثل کریستوبالیت شده است که حین شوک حرارتی به دلیل تبدیلات α به β می‌تواند تأثیر مخرب بر خواص آجر داشته باشد.

در جدول ۱۴ خواص فیزیکی، مکانیکی سرد و گرم و خواص حرارتی نمونه‌های دارای مقاومت شوک حرارتی خوب بدنه‌های کوراندوم-مولایت حاوی ۶۰٪ و آلومینای تبولار ۴۰٪ مولایت ذوبی با یک نمونه مشابه آلمانی مقایسه شده است. آزمایش‌های استحکام خمشی گرم و ضریب انبساط حرارتی در موسسه آلمانی DIPK اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳- شکل ظاهری ذرات مولایت ذوبی

جدول ۱۴- مقایسه خواص فیزیکی، مکانیکی سرد و گرم و حرارتی با نمونه MF60 با نمونه خارجی آلمانی.

نمونه آلمانی	نمونه MF60	نوع آزمایش
۱۸	۱۶	درصد تخلخل باز (درصد حجمی) مطابق استاندارد EN993-10
۲/۹	۲/۹	چگالی کلی یا بالک (g/cm ³) مطابق استاندارد EN993-10
۱۱	۱۳	استحکام خمشی سرد MOR(MPa) مطابق استاندارد EN993-6
۸	۱۰	استحکام خمشی گرم HMOR(MPa) مطابق استاندارد DIN 51045 در دمای °C ۱۲۰۰
۶/۳	۶/۱	ضریب انبساط حرارتی مطابق استاندارد EN993-10 در دمای °C ۱۰۰-۲۰ (×۱۰ ^{-۶} 1/°C)

همان‌طور که مشاهده می‌گردد درصد تخلخل باز نمونه MF60 کمی کمتر از درصد تخلخل باز نمونه آلمانی و با چگالی حدود هم می‌باشد به نظر می‌رسد که آنالیز فازی نمونه آلمانی حاوی مقدار بیشتری کوراندوم نسبت به نمونه MF60 می‌باشد و یا احتمالاً دمای پخت آن کمی پایین‌تر از نمونه داخلی می‌باشد. استحکام خمشی سرد تابعی از نوع و توزیع فازهای کریستالین و آمورف، اندازه و شکل تخلخل‌ها و میزان عیوب موجود در نمونه مثل ترک‌های مویی درونی می‌باشد [۱۱]. استحکام خمشی سرد بالاتر آجر MF60 را نمی‌توان به فاز آمورف نسبت داد زیرا که استحکام خمشی گرم آن نیز بالا می‌باشد بنابراین به نظر می‌رسد که ریزساختار و همچنین درصد تخلخل کمتر مسئول استحکام خمشی بالای نمونه است. ضریب انبساط حرارتی کمتر نمونه MF60 بستگی به نوع و میزان فاز مولایت موجود در آن دارد. ضریب انبساط حرارتی کوراندوم 1/°C ۱۰^{-۶} × ۸/۶ و مولایت ۱۰^{-۶} × ۵/۱ می‌باشد [۴]. بنابراین با توجه به این ضریب انبساط حرارتی بایستی نتایج بهتری را از نمونه MF60 نسبت به نمونه خارجی داشته باشیم.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- افزودن رس و آندالوزیت و میکروسیلیس به بدنه‌های کوراندوم-مولایت خاصیت مقاومت شوک حرارتی خیلی مطلوب ایجاد نمی‌کنند.
- ۲- افزودن آلومینای راکتیو نسبت به میکروسیلیس تأثیر بهتری بر خاصیت مقاومت شوک حرارتی دارد.
- ۳- فرمولاسیون حاوی ۴۲-۴۰٪ مولایت ذوبی و ۶۰-۵۸٪ آلومینای تبولار پس از پخت °C ۱۷۰۰ در اتمسفر معمولی بهترین نتیجه را از نظر مقاومت در برابر شوک حرارتی داشته است.
- ۴- خواص فیزیکی، استحکام خمشی سرد و گرم، ضریب انبساط حرارتی این بدنه‌ها شبیه نمونه‌های خارجی می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Hamidouche, N. Bouaouadja, E. Olagnon, G. Fantozzi, Thermal shock behavior of mullite ceramic", *Ceramics international*, 29(2003) 599-609.
- [2] X. Teng, H. Liu, C. Huong, "Effect of Al₂O₃ particle size on the mechanical properties of alumina based ceramics", *Materials science and Engineering A*, (2007),545-551.
- [3] E. Zanelli, M. Dondi, M. Raimond, G. Guarini, "Phase composition of aluminate-Mullite-zirconia refractory materials", *Journal of the European ceramic society*, 30(2010)29-35.
- [4] H. Schneider, J. Schreuer, B. Hildmann, "Structure and properties of mullite-A review", *Journal of European ceramic society* 28 (2008) 329-344.
- [5] R. Naghizadeh, F. Golestani-fard, H. R. Rezaie, "Stability and phase evolution of mullite in reducing atmosphere", *Material characterization* 62(2011) 540-544.
- [6] E. Wolf, R. Kauermam, H. Hubner, J. A. Rodriguos, V. C. Pondfelli, *Journal of European ceramic society* 15 (1995) 913-920.
- [7] E. Aksel, "The effect of mullite on the mechanical properties and thermal shock behaviour of alumina-mullite refractory materials", *Ceramic international* 29 2 (2003) 183-188
- [8] B. Meng, J. Peng, "Effects of in situ synthesized mullite whiskers on flexural strength and fracture toughness of corundum-mullite refractory materials ", *Ceramic international* 39 (2013) 1525-1531.
- [9] C. Falomaki, T. Ebadzadeh, "Kinetic investigation of the carbothermal reduction of an Iranian clay", 28 (2002) 887-892.
- [10] S. Rahman, U. Feustel, S. Freiman, "Structure description of the thermic phase transformation sillimanite-mullite", *Journal of the European ceramics society* 21(2001) 2471-2478.
- [11] Y. Iqbal, W. E. Lee, "Microstructure Evolution in traxial porcelain" *J.Am.Ceram. Soci.* 83[12] 3121-27 (2000).

