پژوهشگاه مواد و انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد – سرامیک

موضوع

اثر ویژگی‌های پودر، ترکیب بایندر و نسبت پودر به بایندر بر روی رفتار رئولوژی خمیرهای نانو کامپوزیت Al/SiC و شکل‌دهی آن به روش قالبگیری تزریقی

استادان راهنما:

دکتر مسعود علیزاده، دکتر رحیم یزدانی راد

استاد مشاور:

دکتر ابراهیم قاسمی

نگارنده:

آرزو قنبری

سال تحصیلی ۱۳۹۱ – ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

از همراهی، حمایت و راهنمایی‌های ارزشمند استادان ارجمندم آقایان دکتر مسعود علیزاده، دکتر رحیم یزدانی راد و دکتر ابراهیم قاسمی که در تمامی مراحل انجام پروژه همراه و پشتیبان بنده بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

همچنین از مسئولین آزمایشگاهها که در ارائه تجهیزات و انجام آنالیزها کمال همکاری و مساعدت را داشتند، بینهایت سپاسگزارم.

حق تالیف/گردآوری و تحقیق

این پروژه تحقیقاتی به شماره شناسه ۳۷۸۸۵۹ در پژوهشگاه مواد و انرژی به ثبت رسیده است و کلیه دستاوردهای تحقیقاتی شامل نتایج نظری، نتایج علمی و عملی، دانش فنی و سایر موارد مربوط به این پروژه متعلق به پژوهشگاه مواد و انرژی می‌باشد. بهره برداری از نتایج پروژه برای موسسات دولتی و غیر دولتی با مجوز پژوهشگاه مواد و انرژی و درج نام پژوهشگاه مواد و انرژی امکان پذیر است.

چکیده

در این پروژه، رفتار رئولوژی خمیر حاوی بایندر و پودر آلومینیوم/ سیلیکون کارباید مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا مخلوط‌های متفاوت پودری متشکل از پودر آلومینیوم میکرونی و درصدهای مختلف از پودر سیلیکون کارباید میکرونی و نانو تهیه شد. لازم به ذکر است به منظور تهیه مخلوط پودر آلومینیوم/ سیلیکون کارباید نانو، از دو روش تر و خشک، استفاده شد. سپس مخلوط‌های پودری تهیه شده با بایندر مومی ترکیب شدند. سه ماده پارافین واکس، موم صنعتی تصفیه شده و اسید استئاریک به ترتیب به عنوان سه جزء اصلی بایندر، جزء فرعی بایندر و سورفکتانت انتخاب شدند. سپس با استفاده از دستگاه رئومتر، اثر ویژگی‌های پودر (اندازه ذره، توزیع و مورفولوژی ذرات) و نسبت پودر به بایندر، بر روی رفتار رئولوژی خمیرها مورد بررسی قرار گرفت و به منظور ارزیابی رفتار خمیر در شرایط تزریق، رفتار رئولوژی خمیرها با مدل‌های موجود در مراجع، مطابقت داده شد. با تحلیل رفتار رئولوژی خمیرها مشخص شد که تمامی خمیرهای آلومینیوم/ سیلیکون کارباید میکرونی از مدل بینگهام و تمام خمیرهای آلومینیوم/ سیلیکون کارباید نانو از مدل قانون توان تبعیت می‌کنند. همچنین بررسی‌های رئولوژیکی نشان داد که خمیر متشکل از پودر تهیه شده به روش اختلاط خشک، دارای بهترین شرایط رئولوژیکی برای تزریق می‌باشد. با ادامه بررسیها، نسبت بهینه پودر به بایندر برای پودر تهیه شده به روش اختلاط خشک، برابر با ۷۸ درصد وزنی پودر به ۲۲ درصد وزنی بایندر به دست آمد. بعد از تهیه خمیر مناسب و گرانول-سازی خمیر، تزریق خمیر با استفاده از دستگاه قالبگیری تزریقی در شرایط مختلف دما و فشار تزریق انجام گرفت و شرایط بهینه تزریق جهت تولید قطعه سالم بدست آورده شد. در نهایت عملیات بایندرزدایی حرارتی، تحت چرخه حرارتی مشخص و شرایط مختلف بستر و نوع اتمسفر کوره، بر روی قطعات تزریق شده صورت گرفت و چگونگی تولید قطعه سالم به روش قالبگیری تزریقی مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلید واژه: فرایند قالبگیری تزریقی، رئولوژی، نانو کامپوزیت AL/SiC

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ه

فهرست شکل‌ها ..... ز

مقدمه ۱

فصل ۱- مروری بر منابع ۴

۱-۱- آلومینیوم ۴

۱-۲- سیلیکون کارباید ۵

۱-۳- کامپوزیت‌ها ۶

۱-۳-۱- فاز تقویت‌کننده ۷

۱-۳-۲- فاز زمینه ۹

۱-۳-۲-۱- کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۹

۱-۳-۳- کامپوزیت آلومینیوم – سیلیکون کارباید ۱۱

۱-۳-۳-۱- روش‌های تولید کامپوزیت‌های آلومینیوم – سیلیکون کارباید ۱۳

۱-۳-۳-۲- کاربردهای کامپوزیت آلومینیوم – سیلیکون کارباید ۱۴

۱-۳-۳-۳- مزایای کامپوزیت‌های آلومینیوم – سیلیکون کارباید ۱۴

۱-۳-۳-۵- نانو کامپوزیت آلومینیوم/سیلیکن کارباید ۱۵

۱-۴- فرایند قالبگیری تزریقی ۱۵

۱-۴-۱- تعریف، مزایا، معایب، کاربردها ۱۵

۱-۴-۲- مراحل فرایند ۱۶

۱-۴-۳- پودر ۱۷

۱-۴-۴- بایندر ۱۸

۱-۴-۴-۱- موم ها ۲۱

۱-۴-۴-۲- سورفکتانت ها ۲۲

۱-۴-۵- آماده سازی خمیر ۲۳

۱-۴-۵-۱- همگنی خمیر قالبگیری تزریقی ۲۳

۱-۴-۵-۲- نسبت مقدار پودر به مقدار بایندر خمیر قالبگیری تزریقی (بار جامد) ۲۴

۱-۴-۶- رئولوژی ۲۷

۱-۴-۷- انواع رفتارهای جریانی ۲۹
۱-۴-۷-۱- رفتارهای جریانی مستقل از زمان ۲۹
۱-۴-۷-۲- رفتارهای جریانی وابسته به زمان ۳۴
۱-۴-۷-۳- رفتار تیکسوتروپ ۳۵
۱-۴-۷-۴- رفتار رئوپکسی ۳۵
۱-۴-۸- تحقیقات انجام شده در زمینه رئولوژی ۳۶
۱-۴-۸-۱- ترکیب بایندر ۳۶
۱-۴-۸-۲- نسبت پودر به بایندر خمیر ۳۸
۱-۴-۸-۳- شکل و توزیع اندازه ذرات پودر ۳۹
۱-۴-۹- انواع دستگاه‌های قالبگیری تزریقی ۳۹
۱-۴-۱۰- بایندرزدایی ۴۱
۱-۴-۱۰-۱- بایندرزدایی با حلال ۴۱
۱-۴-۱۰-۲- بایندرزدایی حرارتی (تجزیه حرارتی) ۴۲
فصل ۲- روش پژوهش ۴۴
۲-۱- مواد اولیه ۴۴
۲-۱-۱- پودر ۴۴
۲-۱-۱-۱- پودر آلومینیوم ۴۴
۲-۱-۱-۲- پودر سیلیکون کارباید میکرونی ۴۶
۲-۱-۱-۳- پودر سیلیکون کارباید نانومتری ۴۸
۲-۱-۲- بایندر ۴۹
۲-۲- تجهیزات ۴۹
۲-۲-۱- پراش پرتوایکس ۴۹
۲-۲-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی ۴۹
۲-۲-۳- میکروسکوپ الکترونی عبوری ۵۰
۲-۲-۴- آنالیز اندازه ذرات ۵۰
۲-۲-۵- آسیاب گلوله ای سیاره ای ۵۰
۲-۲-۶- آنالیز حرارتی همزمان ۵۰
۲-۲-۷- پیکنومتر گازی ۵۰
۲-۲-۸- بالمیل ۵۰
۲-۲-۹- مخلوط‌کن ۵۱
۲-۲-۱۰- رئومتر ۵۱
۲-۲-۱۱- کوره ۵۱

۲-۲-۱۲- دستگاه قالبگیری تزریقی ۵۱
۲-۳- روش کار ۵۲
۲-۳-۱- تهیه خمیر ۵۳
۲-۳-۱-۱- اختلاط پودرهای اولیه ۵۳
۲-۳-۱-۲- تعیین دمای اختلاط پودر و بایندر ۵۴
۲-۳-۱-۳- اختلاط پودر و بایندر ۵۴
۲-۳-۲- اثر ویژگی‌های پودر بر رفتار رئولوژی خمیر ۵۵
۲-۳-۳- تزریق خمیر ۵۶
۲-۳-۳-۱- انتخاب خمیر ۵۶
۲-۳-۳-۲- ساخت گرانول ۵۶
۲-۳-۳-۳- بررسی شرایط دستگاه قالبگیری تزریقی ۵۶
۲-۳-۳-۴- بررسی چشمی قطعات تزریق شده ۵۶
۲-۳-۴- بایندرزدایی ۵۷

فصل ۳- نتایج و بحث ۵۸

۳-۱- اثر ویژگی‌های پودر بر خواص رئولوژی خمیر ۵۸
۳-۱-۱- اثر افزودن فاز تقویت‌کننده میکرونی بر رفتار رئولوژی خمیرهای آلومینیوم/ سیلیکون کاربابد ۵۸
۳-۱-۱-۱- اثر سرعت برشی برگرانروی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده سیلیکون کارباید میکرونی ۵۸
۳-۱-۱-۲- تطابق مدلهای رئولوژی با رفتار رئولوژی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده سیلیکون کارباید میکرونی ۶۲
۳-۱-۱-۳- اثر دما بر گرانروی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده میکرونی ۶۸
۳-۱-۲- اثر افزودن فاز تقویت‌کننده نانومتری بررفتار رئولوژی خمیرهای آلومینیوم / سیلیکون کاربابد ۷۱
۳-۱-۳- اثر سرعت برشی بر گرانروی خمیرهای حاوی فاز تقویتکننده نانومتری ۷۱
۳-۱-۳-۱- تطابق رفتاررئولوژی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده نانو با مدلهای رئولوژی ۷۴
۳-۱-۳-۲- اثر دما بر گرانروی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده نانومتری ۷۸
۳-۱-۴- مقایسه رفتار رئولوژی خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرونی و نانومتری ۸۱
۳-۱-۴-۱- بررسی تغییرات گرانروی خمیرها با سرعت برشی ۸۱
۳-۱-۴-۲- تطابق مدلهای رئولوژی با رفتاررئولوژی خمیرهای حاوی سیلیکون‌کارباید میکرومتری و نانومتری ۸۲
۳-۱-۴-۳- اثر دما بر گرانروی خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرونی و نانومتری ۸۳
۳-۱-۵- تاثیر روش تهیه پودر بر رفتار رئولوژی خمیر ۸۴
۳-۱-۵-۱- اثر سرعت برشی بر گرانروی خمیرهای ASN5 و ASN5m ۸۶
۳-۱-۵-۲- تطابق مدلهای رئولوژی با رفتار رئولوژی خمیرهای ASN5 و ASN5m ۸۷
۳-۱-۵-۳- اثر دما بر گرانروی خمیرهای ASN5 و ASN5m ۸۸
۳-۱-۶- تعیین نسبت بهینه پودر به بایندر ۹۰

۳-۱-۶-۱- تاثیر بار جامد بر تغییرات گرانروی خمیر با سرعت برشی ۹۰
۳-۱-۶-۲- تاثیر بار جامد بر رفتار رئولوژی خمیر ۹۲
۳-۱-۶-۳- اثر دما بر گرانروی خمیرهای دارای بار جامد مختلف ۹۵
۳-۱-۶-۴- بررسی مدل ویر برای تعیین مقدار بهینه پودر خمیر ۹۷
۳-۱-۶-۵- بررسی مدل ردی برای تعیین مقدار بهینه پودر خمیر ۹۸
۳-۱-۶-۶- بررسی همگنی خمیرها برای تعیین مقدار بهینه پودر به بایندر ۹۹
۳-۱-۷- تزریق (قالبگیری) ۱۰۱
۳-۱-۸- بایندرزدایی ۱۰۵
۳-۱-۸-۱- چرخه بایندرزدایی ۱۰۶
۳-۱-۹- اثر اتمسفر و بستر بایندرزدایی ۱۰۷

فصل ۴- نتیجه گیری ۱۰۹

مراجع ۱۱۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ خصوصیات برخی از ذرات تقویت کننده در فلزات [۱۷]..... ۷
جدول ۱-۲ ویژگی‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی [۱۶]..... ۱۰
جدول ۱-۳ ویژگی‌های برخی از کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت شده با سیلیکون کارباید[۱۶]. ۱۲
جدول ۱-۴ برخی از ویژگی‌های اجزای بایندرهای مورد استفاده در فرایند قالبگیری تزریقی [۷]..... ۱۹
جدول ۱-۵ سیستم بایندرهای مورد استفاده در فرایند قالبگیری تزریقی [۴۷]..... ۲۱
جدول ۲-۱ ویژگی‌های پودر آلومینیوم مصرفی..... ۴۶
جدول ۲-۲ ویژگی‌های پودر سیلیکون کارباید مصرفی..... ۴۸
جدول ۲-۳ ویژگی‌های فیزیکی پودر سیلیکون کاباید نانومتری..... ۴۸
جدول ۲-۴ ویژگی‌های اجزای تشکیل دهنده بایندر..... ۴۹
جدول ۲-۵ کدگذاری نمونه های تهیه شده به روش بالمیل..... ۵۳
جدول ۲-۶ پودرهای تهیه شده به روش اختلاط تر و اختلاط خشک..... ۵۴
جدول ۲-۷ ترکیب بایندر مورد استفاده در پژوهش..... ۵۵
جدول ۲-۸ کدگذاری خمیرهای تهیه شده..... ۵۵
جدول ۲-۹ خمیرهای تهیه شده برای تعیین نسبت پودر به بایندر..... ۵۶
جدول ۳-۱ سرعت برشی بحرانی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده میکرونی..... ۵۹
جدول ۳-۲ بررسی انطباق‌پذیری رفتار شبه پلاستیک خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرونی با مدلهای رئولوژیکی..... ۶۵
جدول ۳-۳ بررسی انطباق‌پذیری رفتار دیلاتانت خمیرهای آلومینیوم سیلیکون کارباید میکرونی با مدل قانون توان..... ۶۷
جدول ۳-۴ مقادیر E محاسبه شده برای خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرونی..... ۷۰
جدول ۳-۵ سرعت برشی بحرانی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده نانومتری..... ۷۲
جدول ۳-۶ مقادیر تنش تسلیم خمیرهای حاوی فاز تقویت کننده نانومتری..... ۷۴
جدول ۳-۷ بررسی انطباق رفتار شبه پلاستیک خمیرهای حاوی فاز نانومتری با مدل‌های رئولوژیکی..... ۷۶
جدول ۳-۸ بررسی انطباق رفتار غلیظ شونده خمیرهای نانو با مدل های قانون توان..... ۷۸
جدول ۳-۹ مقدار E خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده نانومتری..... ۸۰
جدول ۳-۱۰ مقدار سرعت برشی بحرانی خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرونی و نانومتری..... ۸۱

جدول ۳-۱۱ مقدار E خمیرهای دارای سیلیکون کارباید میکرونی و نانومتری ۸۳
جدول ۳-۱۲ مقدار n خمیرهای ASN5 و ASN5m ۸۸
جدول ۳-۱۳ مقدار انرژی فعالسازی جریان خمیرهای ASN5m و ASN5 ..... ۸۹
جدول ۳-۱۴ بررسی مقدار حساسیت خمیرهای با بارجامد مختلف نسبت به سرعت برشی ۹۴
جدول ۳-۱۵ مقدار E خمیرها ۹۶
جدول ۳-۱۶ شرایط بایندرزدایی مختلف قطعات ۱۰۷
جدول ۳-۱۷ تغییرات ابعادی قطعات بایندرزدایی شده ۱۰۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ تقسیم بندی کامپوزیتها برحسب نوع فاز تقویت‌کننده، الف) ذرات ، ب) ویسکرها یا الیاف‌های کوتاه ج)الیاف‌های پیوسته، د)ورقه [۱۳]..... ۷

شکل ۱-۲محدوده مدول یانگ و استحکام ویژه کامپوزیت‌های آلومینیوم با تقویت‌کننده مختلف[۱۶]..... ۹

شکل ۱-۳ طرحی از مراحل فرایند قالبگیری تزریقی پودر [۴۲]..... ۱۷

شکل ۱-۴ موقعیت و وضعیت های امکان پذیر در مخلوط پودر و بایندر a) پودر بیش از حد مورد نیاز b) وضعیت بحرانی c) بایندر بیش از حد مورد نیاز [۵۰]..... ۲۶

شکل ۱-۵ نحوه حرکت صفحات در سیال برشی [۵۲]..... ۲۷

شکل ۱-۶ دسته‌بندی رفتارهای جریانی مستقل از زمان [۳۲]..... ۲۹

شکل ۱-۷ جریان نیوتنی [۵۲]..... ۳۰

شکل ۱-۸ جریان شبه پلاستیک [۵۲]..... ۳۱

شکل ۱-۹ جریان بینگهام [۵۲]..... ۳۱

شکل ۱-۱۰ جریان دیلاتانت [۵۲]..... ۳۲

شکل ۱-۱۱ دسته بندی رفتارهای جریانی وابسته به زمان [۵۲]..... ۳۵

شکل ۱-۱۲ انواع رفتارهای جریانی وابسته به زمان [۵۲]..... ۳۶

شکل ۱-۱۳ رفتار رئولوژی سیستمهای مختلف بایندر [۳۵]..... ۳۷

شکل ۱-۱۴ تاثیراسید استئاریک بر گرانروی بایندر متشکل از پلی اتیلن و پارافین واکس [۳۵]..... ۳۷

شکل ۱-۱۵ تاثیر اسید استئاریک بر روی رفتار رئولوژی خمیرها a)۱۷۵°C و b) ۲۰۰°C [۴۸]..... ۳۸

شکل ۱-۱۶ دستگاه‌های قالبگیری تزریقی الف)نوع پیستونی ب)نوع ماردونی [۴]..... ۴۰

شکل ۱-۱۷ مراحل مختلف فرایند قالبگیری تزریقی (دستگاه قالبگیری تزریقی ماردونی) [۵۶]..... ۴۰

شکل ۲-۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر آلومینیوم مصرفی..... ۴۴

شکل ۲-۲ طیف پراش پرتو ایکس پودر آلومینیوم مصرفی..... ۴۵

شکل ۲-۳ توزیع اندازه ذرات پودر آلومینیوم..... ۴۵

شکل ۲-۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر سیلیکون کارباید میکرونی..... ۴۶

شکل ۲-۵ طیف پراش پرتو ایکس پودر سیلیکون کارباید میکرونی..... ۴۷

شکل ۲-۶ توزیع اندازه ذرات پودر سیلیکون کارباید میکرونی..... ۴۷

شکل ۲-۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر سیلیکون کارباید نانومتری..... ۴۸

شکل ۲-۸ تجهیزات الف) دستگاه رئومتر ب) دستگاه مخلوط کن ج) دستگاه قالبگیری تزریقی ۵۱
شکل ۲-۹ نمودار روش تحقیق..... ۵۲
شکل ۳-۱ تاثیر افزودن فاز تقویت‌کننده میکرونی بر رفتار رئولوژی خمیر..... ۵۸
شکل ۳-۲ اثر سرعت برشی بر گرانروی بایندر..... ۶۱
شکل ۳-۳ چرخش یک ذره کروی شکل [a] و یک ذره بیضوی شکل [b] هم حجم. مشاهده می‌شود که ذره بیضوی ناحیه بزرگتری را آشفته می سازد [۵۱]..... ۶۱
شکل ۳-۴ تغییرات تنش برشی با سرعت برشی خمیرهای آلومینیوم- سیلیکون کارباید میکرونی ۶۲
شکل ۳-۵ تطابق رفتار خمیر در محدوده شبه پلاستیک با مدلهای: (الف- مدل بینگهام ب- مدل قانون توان) ۱) خمیر Al ۲) خمیر ASM5 ۳) خمیرASM10 ۴)خمیر ASM15 ۵)خمیر ASM20.....۶۵
شکل ۳-۶ تطابق رفتار دیلاتانت خمیربا مدل قانون توان ۱- خمیرASM5 ۲- خمیرASM10 ۳- خمیرASM15 ۴- خمیرASM20 ۵- خمیرAL..... ۶۷
شکل ۳-۷ اثر دما بر گرانروی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده میکرونی..... ۶۸
شکل ۳-۸ تغییرات لگاریتمی گرانروی برحسب عکس دما برای خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرونی..... ۷۰
شکل ۳-۹ تغییرات گرانروی با سرعت برشی خمیرهای آلومینیوم – سیلیکون کارباید نانومتری ۷۲
شکل ۳-۱۰ اثر سرعت برشی بر تنش برشی خمیرهای آلومینیوم /سیلیکون کارباید نانومتری..... ۷۴
شکل ۳-۱۱ تطابق رفتار خمیر در محدوده شبه پلاستیک با مدل‌های: (الف – مدل قانون توان ب- مدل بینگهام) ۱)خمیر ASN5 ۲)خمیرASN10 ۳)خمیر ASN15 ۴)خمیر ASN20..... ۷۶
شکل ۳-۱۲ انطباق رفتار دیلاتانت خمیرهای نانو با مدل قانون توان..... ۷۸
شکل ۳-۱۳ اثر دما بر گرانروی خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده نانو..... ۷۹
شکل ۳-۱۴ تعیین مقدار حساسیت خمیرهای حاوی فاز تقویت‌کننده میکرونی به دما (۱- خمیر ASN5۲-خمیرASN10 ۳-خمیرASN15 ۴- خمیرASN20) ۸۰
شکل ۳-۱۵ منحنی تغییرات گرانروی بر حسب سرعت برشی برای مقایسه خمیرهای حاوی سیلیکون کارباید میکرومتری و نانومتری..... ۸۱
شکل ۳-۱۶ تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی خمیرهای ASM5 و ASN5..... ۸۳
شکل ۳-۱۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر آلومینیوم – ۵ درصد وزنی سیلیکون کارباید نانومتری در زمان های مختلف آسیاب (الف – ۱ ساعت ب- ۴ ساعت)، پ –تصویر پراش اشعه ایکس پودر یک ساعت آسیاب شده ۸۵
شکل ۳-۱۸ تغییرات گرانروی برحسب سرعت برشی خمیرهای ASN5m و ASN5.....۸۶
شکل ۳-۱۹ تاثیر سرعت برشی برتنش برشی خمیرهای ASN5 و ASN5m..... ۸۷

شکل ۳-۲۰ تطابق منحنی خمیرها با رفتارهای رئولوژی..... ۸۸
شکل ۳-۲۱ اثر روش تهیه پودر بر حساسیت خمیر به دما..... ۸۹
شکل ۳-۲۲ تعیین انرژی فعالسازی جریان برای خمیرهای ASN5 و ASN5m..... ۸۹
شکل ۳-۲۳ بررسی تغییرات گرانروی خمیرهای دارای بار جامد مختلف با سرعت برشی..... ۹۱
شکل ۳-۲۴ منحنی تغییرات گرانروی با دمای برای خمیرهای دارای بار جامد مختلف..... ۹۲
شکل ۳-۲۵ انطباق‌پذیری خمیرهابا مدل های رئولوژیکی:(الف- مدل قانون توان، ب- مدل بینگهام) ۱- خمیر (۷۸،۲۲) ۲- خمیر(۷۹،۲۱) ۳- خمیر(۸۰،۲۰) ۴- خمیر(۸۱،۱۹)..... ۹۴
شکل ۳-۲۶ تغییرات گرانروی خمیرها با دما..... ۹۵
شکل ۳-۲۷ مقدار E خمیرها الف)(۲۲،۷۸) ب) (۷۹،۲۱) ج)(۸۰،۲۰) د)(۸۱،۱۹)..... ۹۶
شکل ۳-۲۸ بررسی مقدار آلفا برای تعیین درصد وزنی بهینه پودر خمیر..... ۹۸
شکل ۳-۲۹ منحنی رسم شده بر اساس مدل ردی در دمای ۸۵°C و سرعت برشی ۱۰۰ 1/sec..... ۹۹
شکل ۳-۳۰ الف) منحنی گشتاور بر حسب زمان خمیرهای با بار جامد مختلف ب) منحنی گرانروی بر حسب زمان خمیرهای با بار جامد مختلف..... ۱۰۰
شکل ۳-۳۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی خمیر..... ۱۰۱
شکل ۳-۳۲ تصویر خمیر گرانول شده..... ۱۰۱
شکل ۳-۳۳ نمودار پویش گرماسنجی افتراقی بایندر..... ۱۰۲
شکل ۳-۳۴ هیترهای تامین گرما برای دستگاه قالبگیری تزریقی..... ۱۰۳
شکل ۳-۳۵ نحوه جابه جایی خمیر در محل نازل الف)حرکت خمیر به درون قالب ب) برگشت خمیر از قالب به ماردون..... ۱۰۳
شکل ۳-۳۷ قطعات تزریق شده در فشار ۷۰Bar الف) دمای تزریق ۱۰۵°C ب) دمای تزریق ۹۵°C ج) دمای تزریق ۸۵°C..... ۱۰۴
شکل ۳-۳۸ آنالیز توزین حرارتی خمیر (۷۸،۲۲)..... ۱۰۵
شکل ۳-۳۹ چرخه بایندرزدایی خمیر (۷۸،۲۲)..... ۱۰۶

مقدمه

در بسیاری از فناوری‌های جدید و پیشرفته، به موادی با ترکیبی از ویژگی‌های منحصر به فرد نیاز است. این ویژگیها را نمی‌توان با به کار بردن آلیاژهای فلزی رایج، سرامیکها یا مواد پلیمری بدست آورد. کاربرد ویژه این مواد در صنایع هوافضا، دریایی و حمل و نقل می‌باشد. برای مثال مهندسان هوافضا، روز به روز بیش از قبل در جستجوی موادی با چگالی‌های پایین، با استحکام و سخت، مقاوم به سایش، مقاوم به ضربه و مقاوم به خوردگی می‌باشند. در واقع خصوصیات ذکر شده، ترکیبی اعجاب‌انگیز از ویژگی‌های مواد است. اغلب مواد مستحکم، نسبتا چگال می‌باشند. همچنین، افزایش استحکام یا سختی، عموما باعث کاهش در استحکام ضربه[1] می‌شود. دانشمندان و مهندسین، هوشمندانه فلزات، سرامیکها و پلیمرهای مختلف را به منظور طراحی کامپوزیتها، ترکیب کرده‌اند. تاکنون کامپوزیت‌های بیشماری جهت بهبود ویژگی‌های مکانیکی همچون سختی، چقرمگی و استحکام خلق شده‌اند [۱].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی در کارهای تحقیقاتی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. زیرا انتخاب فلز زمینه و تقویت‌کننده مناسب، جهت تولید کامپوزیتی با خواص مطلوب و دلخواه، امکان پذیر است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارای مزایای زیادی از قبیل استحکام، مدول الاستیک و چقرمگی بالا، قابلیت شوک‌پذیری خوب، حساسیت پایین به عیوب سطحی و هدایت حرارتی و الکتریکی بالا می‌باشند. اکثر کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌هایی هستند که از زمینه آلیاژ آلومینیوم تشکیل شده‌اند. از این کامپوزیتها در مواردی که به وزن سبک و استحکام بالا نیاز است، استفاده می‌شود [۲].

در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی، نوع آلومینیومی آن با توجه به انعطاف‌پذیری، مقاومت به سایش بالا، هدایت حرارتی خوب، قابلیت عملیات حرارتی، استحکام و مدول الاستیک مناسب، چگالی نسبتا کم و قابلیت کار در دمای بالا اهمیت ویژه دارد. نوع تقویت‌کننده در این مواد اغلب غیر فلزی است و در اکثر موارد از سیلیکون کارباید یا آلومینا به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود [۳].

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی[2] تقویت شده با ذرات، با توجه به دارا بودن خواصی ویژه، بیشترین کارایی را به خود اختصاص داده‌اند. این خصوصیات ویژه عبارتند از: همگن و یکنواخت بودن، مقرون به صرفه‌تر بودن نسبت به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف با همان ترکیب و همچنین امکان قابلیت ساخت با روش‌های مرسوم شکل‌دهی نظیر اکستروژن ، نورد و آهنگری. آلومینا یا سیلیکون

[1] Impact strength

[2] Aluminium Matrix Composite (AMC)

کارباید از انواع مرسوم تقویت‌کننده می‌باشند که با توجه به استحکام، سختی و مدول بالا به عنوان انتقال بار عمل می‌کنند. با این وجود سیلیکون کارباید با توجه به قیمت کمتر نسبت به آلومینا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

مرحله شکل‌دهی، یک مرحله کلیدی و تعیین‌کننده در فرایند تولید قطعه به شمار می‌رود. اهمیت این مرحله در زمینه رقابت بر سر هزینه تولید محصولات پرکاربرد، می‌باشد. در طی ۱۰ الی ۱۵ سال گذشته، هدف، توسعه و گسترش فرایندهای شکل‌دهی خاصی بوده است که بتوان با این فرایندها، محصولی را تولید نمود که مقدار نیاز آن به ماشینکاری به حداقل ممکن برسد. روش های شکل‌دهی عمده، ریخته-گری دوغابی، اکستروژن، پرس تک محوره، پرس ایزواستاتیک، ریخته‌گری نواری و قالبگیری تزریقی می-باشند [۴].

برای اولین بار در دهه ۱۹۳۰ از فرایند قالبگیری تزریقی برای ساخت قطعات سرامیکی استفاده شد. به طوریکه در سال ۱۹۳۷، این فرایند تبدیل به یک فرایند تولیدی برای ساخت ماده عایق سردو شاخه برق[1]، گردید. با این حال هنگام انتخاب فرایند برای ساخت این قطعات، فرایندهای مرسوم‌تر ساخت قطعات سرامیکی مانند اکستروژن و بعد از آن پرس ایزواستاتیک همراه با ماشینکاری خام ترجیح داده می‌شدند. در نتیجه‌ی استفاده از سرامیکها در تولید قطعات توربین گازی، قالبگیری تزریقی سرامیکها در دهه ۱۹۷۰ و۱۹۸۰ رونقی دوباره گرفت. همزمان روش‌ها و تکنیک‌هایی برای قالبگیری تزریقی مخلوط پودرهای فلزی به منظور تولید مواد با اشکال پیچیده، درحال گسترش و توسعه بود [۵].

تولید کنندگان قطعات قالبگیری تزریقی فلزی[2] در سرتا سر جهان، سالانه در حدود ۱/۶ بیلیون دلار از فروش قطعات، به دست می‌آورند و حدود ۶۰۰۰ کارگر یا کارمند در این حوزه مشغول به کار می‌باشند. صنعت آمریکا ۴۹ درصد فروش و تولیدکنندگان قالبگیری تزریقی فلزی آسیا و اروپا به ترتیب ۲۶ و ۲۵ درصد فروش قطعات قالبگیری تزریقی فلزی را به خود اختصاص می‌دهند. تمام فلزات شناخته شده کاربردی و فلزات سخت به صورت پودر موجود می‌باشند، از این رو، تنوع گسترده‌ای از مواد در حوزه قالبگیری تزریقی پودر مطرح است [۶].

موادی از قبیل فلزات، آلیاژها، سرامیکها، سرمتها و کامپوزیتها توسط روش قالبگیری تزریقی پودر تولید شده‌اند اما تاکنون تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی توسط این روش توسعه نیافته است [۲].

[1] Spark plug insulators
[2] Metal injection molding (MIM)

مزایای اصلی و عمده فناوری ساخت قطعات به روش فرایند قالبگیری تزریقی، تولید محصولاتی با چگالی بالا، اشکال بسیار پیچیده، ویژگی‌های مکانیکی بالاتر و سطح نهایی بهتر نسبت به محصولات تهیه شده به روش‌های متالورژی پودر سنتی می‌باشد [۷].

فصل ۱– مروری بر منابع

۱–۱– آلومینیوم

تقریبا ۷/۵ درصد کل پوسته زمین از آلومینیوم[1] تشکیل شده است که پس از اکسیژن (۴۹/۲ درصد) و سیلیسیم (۲۵/۸ درصد)، سومین عنصر فراوان از نظر کمیت بوده و پس از آن آهن، فقط۴/۳ درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد [۸].

تا قبل از جنگ جهانی دوم، آلومینیوم، بیشتر به عنوان وسائل و ظروف آشپزخانه معرفی شده و مصرف آن در کابل‌های انتقال الکتریسیته با ولتاژ زیاد نیز توسعه یافته بود، ولی در خلال جنگ نیاز به طرح‌های جدید هواپیما و آلیاژهای پر استحکام، توسعه و مصارف جدید آلومینیوم را سرعت بخشید. پس از جنگ نیز مصارف شهری و صنعتی آلومینیوم، گسترده گشت و امروزه این فلز به عنوان یک ماده اولیه صنعتی محسوب شده و در بازار جهان مانند فولاد و در واقع پس از فولاد مهمترین و پرمصرف‌ترین ماده مصرفی می‌باشد [۸]. آلومینیوم، پرمصرف‌ترین فلز غیرآهنی در جهان است که میزان مصرف سالانه آن هم اکنون به ۲۴ میلیون تن می‌رسد [۹].

امروزه آلومینیوم به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد، جای وسیع و مهمی در صنعت باز نموده است. از جمله این خواص می‌توان به چگالی پایین (حدود $2/7\ gr/cm^3$) ، نسبت استحکام به وزن بالا، هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی بالا، قابلیت انعکاس زیاد (نور و حرارت)، شکل‌پذیری با روش‌های مختلف و استحکام بالا در درجه حرارت‌های پایین اشاره نمود [۸].

یکی دیگر از خواص ویژه آلومینیوم، مقاومت زیاد این فلز در مقابل خوردگی است. آلومینیوم خالص وقتی در هوا قرار می‌گیرد، بلافاصله با یک لایه چسبنده اکسید آلومینیومی پوشیده می‌شود. این لایه پوششی، مانع خوردگی می‌گردد [۸،۹]. اگر در اثر سائیدگی این لایه کنده شود، بلافاصله دوباره تشکیل می‌شود. ضخامت این لایه نازک طبیعی در حدود ۰/۰۲۵ میکرون است، با این وجود به قدری محکم است که مانع موثری در مقابل اغلب مواد خورنده محسوب می‌شود [۸].

آلومینیوم دارای ساختار کریستالی مکعبی با سطوح مرکزدار می‌باشد این شبکه کریستالی در فلز آلومینیوم در محدوده دمایی ۴K الی نقطه ذوب آلومینیوم (۹۳۳K، ۶۶۰°C) پایدار است. شعاع اتمی آلومینیوم برابر با ۱/۴۳ آنگستروم و وزن اتمی آلومینیوم برابر با ۲۶/۹۸ گرم بر مول می‌باشد [۹].

[1] Aluminium (Al)

۱-۲- سیلیکون کارباید

سیلیکون کارباید[1] در سال ۱۸۹۰ توسط اچسون با عبور جریان الکتریکی از میان مخلوطی از پودر کربن و رس، سنتز گردید. در ابتدا این ماده، به عنوان مخلوطی از کربن و کوراندوم (اکسید آلومینیوم) تصور می‌شد و نام تجاری کربوراندوم را به خود گرفت. اچسون خیلی زود متوجه شد که این ماده سیلیکون کارباید بوده است. این محصول دارای موفقیت تجاری سریعی در کاربرد، به عنوان ساینده بود. روش اچسون هنوز هم فرایند تولید اصلی برای سیلیکون کارباید محسوب می‌گردد [۱۰].

سیلیکون کارباید، بیشتر به دو گونه بتا سیلیکون کارباید و آلفا سیلیکون کارباید یافت می‌شود. بتا سیلیکون کارباید، از لحاظ کریستالوگرافی ساختمانی مکعبی داشته و در دمای پایین پایدار است. در حالی که آلفا سیلیکون کارباید دارای ساختمان هگزاگونال است و پایدار در دمای بالا می‌باشد [۱۱]. نقطه ذوب سیلیکون کارباید ۲۵۴۵ °C و وزن مولکولی آن برابر با ۴۰/۰۹۷ گرم بر مول می‌باشد [۱۰].

از ویژگی‌های سیلیکون کارباید می‌توان به نیمه رسانا و دیرگداز بودن، قابلیت استفاده در مصارف الکتریکی، مقاوم به سایش، مقاوم به خوردگی و دارای استحکام در دمای بالا اشاره نمود [۱۲].

سیلیکون کارباید یک ماده بسیار سخت و ساینده می‌باشد. این ماده دارای مقاومت بسیار عالی در برابر سایش و حمله شیمیایی در محیط‌های کاهنده است. سیلیکون‌های آزاد داخل ساختار سیلیکون کارباید در محیط اکساینده، بی‌درنگ اکسید می‌شوند در حالی که، این ماده (سیلیکون کارباید) در دماهای بسیار بالا اکسید می‌شود. علی‌رغم اینکه سیلیکون و کربن دو تا از فراوانترین عناصر در کره زمین می‌باشند، اما سیلیکون کارباید در طبیعت یافت نمی‌شود. کربوراندوم[2] نام تجاری سیلیکون کارباید می‌باشد. این اسم ترکیبی از نام‌های لاتین کربن و کوراندوم[3] می‌باشد. پرس گرم، سینتر، سینتر واکنشی[4] و رسوب شیمیایی از فاز بخار[5]، چهار روش عمده تهیه سیلیکون کارباید می‌باشند [۱۳].

[1] Silicon Carbide (SiC)
[2] carborundum
[3] corundum
[4] Reaction sintering
[5] Chemical vapor deposition (CVD)