



Critical Powder Volume Concentration (CPVC) of Fe-2Ni low-Alloy Steel Powder and Selection of a Proper Binder System from Rheological Point of View in order to Metal Injection Molding

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Askari A.^{*1} PhD,
Alaei M.² PhD,
Mehdipoor Omrani A.³ PhD,
Nekouee Kh.² PhD

How to cite this article

Askari A, Alaei M, Mehdipoor Omrani A, Nekouee Kh. Critical Powder Volume Concentration (CPVC) of Fe-2Ni low-Alloy Steel Powder and Selection of a Proper Binder System from Rheological Point of View in order to Metal Injection Molding. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):1079-1088.

¹Department of Mechanical Engineering, NazarAbad Center, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

²Center of Composite Materials, Faculty of Materials & Manufacturing Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Materials & Manufacturing Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, NazarAbad Center, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. Postal Code: 3331818156
Phone: +98 (26) 45350022
Fax: +98 (26) 45354259
ali.askari@kiauo.ac.ir

Article History

Received: May 08, 2019

Accepted: August 26, 2019

ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

Metal Injection Molding (MIM) is a novel manufacturing technology, used for complex geometric parts at a high production rate. One of the most important parameters in this method is the selection of proper feedstock consisting of optimal powder loading and an optimized binder system. The defects, which appear during the injection process, cannot be removed in later process stages and this is for the reason that the rheological behavior of the feedstock needs to be checked to make sure that it has the required injection properties. In this study, a multi-component wax-based binder system has been selected in order to inject Fe-2Ni powder. For this reason, a multi-component wax-based binder system with different percentages of constituents was used to produce 11 feed modes containing 60% vol. % of the powder. Further, the viscosity and its variation with the shear rate for 11 developed samples have been measured. The results showed that the feedstock consisting of 66 vol. % Paraffin wax, 19 vol. % Polypropylene, 10 vol. % Carnauba wax and 5 vol. % Stearic Acid has the lowest viscosity and lowest sensitivity to the shear rate and this leads to the complete filling of the mold cavity and production of a healthy component for very complex geometries. After achieving the proper binder system, the critical powder loading for the binder system was measured by 58 vol. % using torque rheometer.

Keywords Metal Injection Molding (MIM); Fe-2Ni Low-Alloy Steel; Binder System; Rheological Properties

CITATION LINKS

[1] The rheology of metal injection molding [2] Optimization of powder injection molding of feedstock based on aluminum oxide and multicomponent water-soluble polymer binder [3] Rheology: Principles, measurements, and applications [4] Torque rheology of zircon feedstocks for powder injection moulding [5] Production of alumina parts by powder injection molding with a binder system based on high density polyethylene [6] A simple model for viscosity of powder injection moulding mixes with binder content above powder critical binder volume concentration [7] Rheological investigation of water atomised stainless steel powder for micro metal injection molding [8] Rheological study of waste porcelain feedstocks for injection moulding [9] Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels [10] Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316 L powder injection moulding feedstocks [11] Powder injection moulding of premixed ferritic and austenitic stainless steel powder [12] Bubbles, drops, and particles in non-Newtonian fluids (Chemical Industries) [13] Injection molding of metals and ceramics [14] The characterization and flow behavior of 316L stainless steel feedstock for Micro Metal Injection Molding (μ MIM) [15] Modified metal injection moulding process of 316L stainless steel powders using thermosetting binder [16] Wear behavior and mechanical performance of metal injection molded Fe-2Ni sintered components [17] Optimisation of process conditions in powder injection moulding of microsystem components using a robust design method: part I [18] Sintering characteristics of injection moulded 316L component using palm-based biopolymer binder [19] Maleic anhydride-grafted polypropylene: FTIR study of a model polymer grafted by ene-reaction [20] Copper injection molding using a thermoplastic binder based on paraffin wax [21] Low-pressure injection molding processing of a 316-L stainless steel feedstock [22] Effects of surfactant on properties of MIM feedstock [23] Binder system for micropowder injection molding [24] Polymer handbook [25] Investigation and modeling of binder removal process in nano/micro bimodal powder injection molding [26] Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding [27] Analysis of the rheological behavior and stability of 316L stainless steel-TiC powder injection molding feedstock

تعیین درصد حجمی بحرانی پودر فولاد کم آلیاژ Fe-2Ni و انتخاب سیستم چسب مناسب از دیدگاه رئولوژیکی به منظور قالب‌گیری تزریقی پودر فلز

علی عسکری^{PhD}

گروه مهندسی مکانیک، مرکز نظریات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

محمدحسین علانی^{PhD}

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

علی مهدی‌پور عمرانی^{PhD}

گروه مهندسی مکانیک، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

خانعلی نکویی^{PhD}

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، روشی نوین به‌منظور تولید قطعات با هندسه پیچیده در تیراژ بالا است. یکی از مهم‌ترین ملاحظات این فرآیند، انتخاب خوراک متشکل از درصد حجمی مناسب پودر فلز همراه سیستم چسب مناسب است. عیوبی که در مرحله تزریق در قطعه ایجاد می‌شود، در مراحل بعدی فرآیند قابل اصلاح نبوده و از این رو بررسی رئولوژیکی خوراک ماده اولیه به‌منظور حصول اطمینان از داشتن شرایط لازم برای تزریق امری ضروری است. در این مقاله به انتخاب سیستم چسب مناسب به‌منظور قالب‌گیری قطعه از جنس فولاد کم‌آلیاژ Fe-2Ni پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا از یک سیستم چسب پایه واکس چندجزیی با درصد‌های مختلف اجزاء تشکیل‌دهنده برای تولید ۱۱ حالت خوراک حاوی ۶۰٪ حجمی پودر فلز استفاده شده است. در ادامه به‌منظور بررسی خوراک‌ها از دیدگاه رئولوژیکی، ضمن اندازه‌گیری گرانروی خوراک‌ها، تغییرات آن نسبت به نرخ برش محاسبه شده است. نتایج نشان داد که خوراک حاوی ۶۶٪ پارافین‌واکس، ۱۹٪ پلی‌پروپیلن، ۱۰٪ کارناباواکس و ۵٪ اسیداستئاریک دارای کمترین گرانروی و کمترین حساسیت نسبت به نرخ برش است که منجر به پرکردن کامل حفره قالب و تولید قطعه سالم حتی برای هندسه‌های بسیار پیچیده می‌شود. پس از دستیابی به سیستم چسب مناسب، درصد حجمی بحرانی پودر فلز نیز برای سیستم چسب فوق با استفاده از دستگاه رئومتر گشتاور محاسبه شد که برابر با مقدار ۵۸٪ حجمی است.

کلیدواژه‌ها: قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، فولاد کم‌آلیاژ Fe-2Ni، سیستم چسب، خواص رئولوژیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۴

*نویسنده مسئول: ali.askari@kiau.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت علم و فناوری نیاز به قطعات پیشرفته ساخته‌شده از مواد جدید احساس می‌شود. فرآیندهای تولید مدرن، به محققین در ساخت قطعات جدید مورد نیاز صنایع کمک

شایانی می‌کنند. قالب‌گیری تزریقی پودر فلز که یکی از زیرمجموعه‌های اصلی قالب‌گیری تزریقی پودر است، به‌منظور استفاده از مزایا و حذف معایب فرآیندهای تزریق و متالورژی پودر توسعه داده شده است. این فرآیند برای تولید قطعات کوچک با هندسه پیچیده در تیراژ بالا استفاده شده و با حذف مراحل ثانویه تولید، مانند ماشینکاری و در نتیجه هدر مواد، به صرفه‌جویی در هزینه‌ها در مقایسه با تکنولوژی‌های رقیب منجر می‌شود. برای تولید محصول مناسب با بالاترین چگالی ممکن و خواص مکانیکی مطلوب با استفاده از این فرآیند، می‌بایست پارامترهای مهم موجود در هر مرحله از فرآیند MIM به‌طور کامل کنترل شوند. مراحل و قسمت‌های این فرآیند به‌ترتیب شامل آماده‌سازی و تولید خوراک، تزریق خوراک به‌منظور ایجاد هندسه قطعه، چسب‌زدایی به‌منظور حذف سیستم چسب و تف‌جوشی به‌منظور افزایش خواص مکانیکی است. یکی از پارامترهای مهم در فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، تحلیل رئولوژیکی ماده خام اولیه به‌منظور اطمینان از انجام موفق عملیات تزریق است. رئولوژی را می‌توان علم شناخت جریان و حرکت در مواد توصیف کرد. در حقیقت برای اینکه قطعه‌ای بدون اعوجاج و ترک تولید شود، مطالعه روی رفتار رئولوژیکی ماده خام اولیه بسیار مهم است. به عبارت دیگر، استفاده از ماده خام اولیه مناسب که از اجزاء و میزان مناسب اجزاء لازم در مخلوط سیستم چسب و پودر فلز تشکیل شده باشد، متضمن تولید یک محصول با کیفیت مناسب است. به‌طور کلی، رفتار رئولوژیکی ماده خام اولیه شامل گرانروی و چگونگی تغییرات آن نسبت به تنش برشی و دما است. برای سیالات تک‌فازی که صرفاً شامل ترکیباتی با وزن مولکولی کم هستند، گرانروی مستقل از نرخ برش بوده و تنها تابع فشار و دما است. این نوع سیالات، نیوتنی نامیده می‌شوند^[1]:

$$\eta = \eta(TP) \quad (1)$$

برای یک سیال نیوتنی تغییرات تنش برشی برحسب نرخ برش که اصطلاحاً منحنی سیلان نامیده می‌شود، به‌صورت یک خط راست است. بنابراین در خصوص این مواد می‌توان با داشتن مقدار گرانروی، عکس‌العمل سیال را در مقابل هر گونه تغییر شکلی پیش‌بینی و تعیین نمود. از سوی دیگر امولسیون‌ها، محلول‌های جامد در مایع و مذاب‌های پلیمری عموماً سیالاتی غیرنیوتنی هستند. در صورتی که این مواد در معرض یک برش ساده و مداوم قرار گیرند، ملاحظه خواهد شد که گرانروی آنها ثابت نبوده و با نرخ برش تغییر می‌کند. برخی از محققین، بروز رفتار غیرنیوتنی در مخلوط‌های پودر- پلیمر در فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز را ناشی از شکسته‌شدن کلوخه‌های متشکل از ذرات پودر می‌دانند^[2]. در این حالت دو ساز و کار بر گرانروی تاثیر می‌گذارند. فروپاشی کلوخه‌ها حین اعمال برش منجر به کاهش مقدار مایع حبس‌شده در میان ذرات می‌شود و به همین دلیل گرانروی در اثر کم‌شدن کسر حجمی موثر پودر کاهش می‌یابد. همزمان با این فرآیند، تغییرات در گرانروی می‌تواند با انرژی تلف‌شده ناشی از دوران و

شاخص قابلیت قالب‌گیری [7, 4] اشاره نمود. برای هر جریان مایع و شبه‌پلاستیک (خمیری) می‌توان رابطه‌ای بین تنش برشی (τ) و نرخ تنش برشی ($\dot{\gamma}$) آن، مطابق معادله زیر تعریف کرد [1]:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

که در آن K ثابت معادله و n شاخص رفتار مایع (خمیر) است. به عبارت دیگر، n نشان‌دهنده میزان خمیری شکل‌بودن رفتار مایع (خمیر) است، به‌طوری که هر چه مقدار آن کمتر باشد، خواص ماده خام اولیه شبه‌پلاستیکی‌تر است و در نتیجه برای تزریق درون قالب مناسب‌تر خواهد بود [1]. اگر مقدار n بزرگ‌تر از یک باشد، بدین معنی خواهد بود که پودر فلز و سیستم چسب به‌دلیل نرخ برشی بالا از هم جدا می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم دیگر که برای ماده خام اولیه مطرح می‌شود، مقدار گرانروی آن (Π) است که به‌طور کلی تابعی از نرخ برش، دما، میزان چسبندگی سیستم چسب و مقدار حجمی پودر است. گرانروی ماده خام اولیه با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود [1]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

با جایگذاری معادله ۳ در معادله ۴، معادله ۵ به‌دست خواهد آمد [12]:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (5)$$

اگر از دو طرف معادله ۵ لگاریتم گرفته شود و نمودار $\log \eta$ برحسب $\log \dot{\gamma}$ رسم شود، شیب نمودار برابر با مقدار $n-1$ است و از اینجا می‌توان مقدار n را محاسبه کرد و تحلیل لازم را روی ماده خام اولیه انجام داد. یکی دیگر از پارامترهای تعیین‌کننده برای ماده خام اولیه پارامتر دما خواهد بود، بدین معنی که ماده خام اولیه با توجه به تغییرات دما چگونه تغییر خواهد کرد و روی گرانروی چه تاثیری خواهد گذاشت. در صورتی که تغییرات گرانروی نسبت به دما کم باشد، از ایجاد تمرکز تنش در قطعه، ترک در قطعه نهایی و همچنین اعوجاج جلوگیری خواهد شد. به‌طور کلی، گرانروی یک سیستم چسب به‌صورت ذاتی تغییرات زیادی با دما می‌کند. این در حالی است که با افزودن مقدار زیادی از ذرات پودر، این حساسیت گرانروی مخلوط نسبت به دما کاهش می‌یابد. در نتیجه در درصدهای حجمی بالای پودر، حساسیت گرانروی ماده خام اولیه نسبت به دما کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که بتوان از محدوده وسیعی از دما برای فرآیند تزریق درون قالب بهره گرفت [13]. همچنین تغییرات کم گرانروی با دما باعث می‌شود که هنگام تزریق، فشار بیشتری به حفره‌های قالب برای پرکردن آنها وارد شود که در نتیجه از ایجاد انقباض بالا در قطعات نیز جلوگیری خواهد شد. تاثیر بارگذاری پودر بر خواص رئولوژیکی، تاثیر دما و نرخ برش بر گرانروی و بررسی میزان اعوجاج قطعه پس از تزریق، موارد مهمی هستند که همگی توسط لی و همکاران [9] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ویلما و همکاران [5]، از طریق اندازه‌گیری گشتاور، رفتار رئولوژیکی و آزمون همگنی، ترکیبی شامل ۵۸ درصد حجمی بارگذاری پودر را برای قالب‌گیری تزریقی پودر از جنس آلومینا مناسب دانستند. همچنین سوتوماوور و

شکسته‌شدن کلوخه‌ها نیز مرتبط باشد. با افزایش بیشتر نرخ برش، ساختار ذرات تخریب و منظم‌شدن ذرات و پلیمرها در جهت سیلان، امکان جنبش و تحرک بین ذره‌ای را فراهم می‌آورد. در این شرایط نیروی هیدروپلاستیکی بر گرانروی غلبه یافته و منجر به بروز رفتار رقیق‌گردانی برشی می‌شود. به بیان دیگر و به‌طور خلاصه می‌توان اظهار نمود که کاهش گرانروی با افزایش نرخ برش به آرایش مجدد ذرات پودر و پلیمر و ایجاد ساختار منظم‌تر ارتباط می‌یابد. از این رو، کلیه سیالاتی که منحنی جریان آنها خطی و ثابت نیست را غیرنیوتنی نامیده که به سه گروه اصلی سیالات مستقل از زمان، سیالات تابع زمان و سیالات ویسکوالاستیک تقسیم‌بندی می‌شوند [3]. سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان که در آنها نرخ برش در یک نقطه مشخص فقط تابع تنش برشی در همان لحظه و همان نقطه است، خود به دو گروه سیالات دارای تنش تسلیم و فاقد تنش تسلیم تقسیم‌بندی می‌شوند. سیالاتی که دارای تنش تسلیم هستند، همانند بینگهام، می‌توانند مقدار مشخصی تنش را بدون آنکه جاری شوند تحمل نمایند. در مقادیر بالاتر از این تنش، ماده به‌طور مداوم همانند یک سیال تغییر شکل خواهد یافت. سیالات فاقد تنش تسلیم نیز به نوبه خود به گروه‌های سیالات شبه پلاستیک (Pseudo-plastic) و سیالات دیلاتانت (Dilatant) تقسیم‌بندی می‌شوند. دلیل کاهش گرانروی در اثر افزایش نرخ برش را می‌توان توسط مفهوم "چگالی گره‌خوردگی" که با تغییر سرعت برش تغییر می‌نماید، مورد پیش‌بینی قرار داد. بدین منظور، چنین تصور می‌شود که اعمال تنش برشی سبب افزایش سرعت از بین رفتن گره‌خوردگی‌های موجود در ساختار پلیمر می‌شود، ولی شدت ایجاد گره‌های جدید را افزایش نمی‌دهد و بدین ترتیب تعداد گره‌خوردگی‌ها در یک حجم ثابت کاهش یافته که این امر به کاهش گرانروی می‌انجامد [7]. مخلوط‌های پودر-پلیمر در گروه سیالات شبه‌پلاستیک قرار می‌گیرند که گرانروی (Π) آنها تابعی از نرخ برش ($\dot{\gamma}$)، دما (T)، بارگذاری پودر (ϕ) و گرانروی سیستم چسب (Π_b) است [1]:

$$\Pi(\dot{\gamma}, T, \phi, \Pi_b) \quad (2)$$

رفتار رئولوژیکی ماده، تاثیرپذیر از اندازه و هندسه پودر، سیستم چسب و درصد اجزاء تشکیل‌دهنده آن و نحوه ترکیب آنها به‌صورت ماده خام اولیه است. طی سال‌های اخیر، محققان زیادی مطالعات خویش را در زمینه ارزیابی و بهینه‌سازی خوراک‌های محتوی پودرهای فلزی و سرامیکی متمرکز نموده‌اند. از میان مطالعات مذکور، خوراک‌های محتوی پودر آهن/نیکل، آلومینا، زیرکن، چینی، سلیکا و فولاد زنگ‌نزن بیش از سایر پودرها مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند [8, 4, 1]. ارزیابی مشخصات خوراک و رفتار رئولوژیکی آن از طریق متغیرها و مفاهیم مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است که از این میان می‌توان به تاثیر نرخ برش، درجه حرارت، کسر حجمی جامد [1]، اعوجاج، کنترل رواداری ابعادی [9]، توزیع اندازه ذرات [10]، چگالی [11]، رئولوژی گشتاوری [4]، ترکیب سیستم چسب [5]، مدل‌های رئولوژیکی [6]، تنش تسلیم [8] و

و استفاده از میزان چسب کمتر حین فرآیند می‌شود. توزیع اندازه دانه‌های پودر مورد استفاده در این مقاله، توسط دستگاه تحلیلگر اندازه ذرات مدل Malvern-Mastersizer 2000- Hydro (A) 2000G واقع در دانشگاه علم و صنعت پوهانگ (POSTECH) کره جنوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. با کاهش اندازه ذرات پودر، افزایش تراکم و چگالی قطعه نهایی حاصل می‌شود. این در حالی است که با افزایش تراکم، گرانروی خوراک افزایش یافته و به تبع آن فشار تزریق نیز بالا می‌رود.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی پودر فولاد کم‌آلیاژ مورد استفاده

ترکیب	آلیاژ FeNi2Mo0.5
آهن	۹۶/۶۶٪
کربن	۰/۴۲٪
نیکل	۲/۱۵٪
مولیبدن	۰/۴۹٪
اکسیژن	۰/۲۸٪
چگالی	۷/۹۵ gr/cm3

۲-۳- سیستم چسب

سیستم چسب مورد استفاده در فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، رابطه مستقیم با کیفیت قطعه تولیدی دارد. در فرآیند MIM از سیستم چسب (غالباً ترموپلاستیک‌ها) به‌عنوان ماده انتقال‌دهنده ذرات پودر به داخل قالب استفاده می‌شود. در مطالعات محدودی نیز مشاهده شده است که از ترموست‌ها برای تزریق پودر فلز استفاده شده است [15]. انتخاب سیستم چسب مناسب وابسته به شرایط پودر شامل جنس، شکل و میزان بارگذاری آن در خوراک ماده اولیه است. سیستم چسب به‌کاررفته در فرآیند تزریق پودرهای فلز با خصوصیات نزدیک به پودر Fe-2Ni در تحقیقات پیشین شامل پلی‌پروپیلن (PP) به‌عنوان پلیمر پیکره و پارافین‌واکس (PW)، کارناباواکس (CW) و اسیداستئاریک (SA) به‌عنوان اضافه‌شونده هستند [16, 17]. هر یک از اجزاء، صرف‌نظر از مقدارشان وظیفه‌ای خاص را در سیستم چسب ایفا می‌نمایند. پلی‌پروپیلن که در بسیاری از تحقیقات مرتبط با قالب‌گیری تزریقی پودر مورد استفاده قرار گرفته است، نقش پلیمر پیکره را ایفا می‌کند [18]. این پلیمر، وظیفه حفظ و نگهداری شکل قطعه را حین فرآیند چسب‌زدایی و پیش از تف‌جوشی بر عهده دارد و آخرین جزئی است که از ساختار قطعه خارج می‌شود. به‌کارگیری این پلیمر از نظر اقتصادی منطقی بوده و ساختار محکمی دارد. صلبیت و مقاومت کششی بالا، چگالی کم، کربن باقی‌مانده کمتر و حفظ شکل و استحکام قطعه قالب‌گیری‌شده در دمای تجزیه سایر اجزاء سیستم چسب (به‌دلیل دمای تغییر شکل حرارتی بالا) از خصوصیات دیگر این پلیمر محسوب می‌شوند [19]. پارافین‌واکس و کارناباواکس به‌عنوان فعال‌کننده سطحی و ایجادکننده پیوند بین پلیمر و دانه‌های پودر به ترکیب اضافه می‌شوند. این امر منجر به افزایش پایداری ذرات پودر در اثر اعمال

همکاران [10] در تحقیق خود که در آن اثر اندازه ذرات پودر فولاد زنگ‌نزن 316L را روی رفتار رئولوژیکی ماده بررسی کرده‌اند، از پنج نمونه خوراک با میزان درصد حجمی پودر فلز ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵٪ (میزان بارگذاری حجمی پودر فلز نسبت به چسب) استفاده کرده‌اند و سپس به‌صورت تدریجی با چسبی که ۵۰ درصد حجمی آن از پلی‌اتیلن چگالی بالا و ۵۰ درصد حجمی واکس پارافین تشکیل شده بود، مخلوط کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که هر چه میزان پودر استفاده‌شده در مواد تغذیه تزریقی کمتر باشد، میزان انرژی لازم برای مخلوط‌کردن و استفاده از آن در فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر کاهش می‌یابد. هو و همکاران [14] روی خصوصیات و رفتار جریان خوراک تزریقی فولاد زنگ‌نزن 316L در فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر در ابعاد میکرو، پژوهش خود را انجام داده‌اند. در تحقیق آنها، حصول اطمینان از سازگاری پودر با سیستم چسب و جلوگیری از ایجاد عیب جدایش سیستم چسب از پودر فلز حین فرآیند، از نکاتی است که مورد توجه قرار گرفته است. رفتار رئولوژیکی خوراک‌های استفاده‌شده در این تحقیق نشان داد که با بالا رفتن نرخ برشی و دما، گرانروی کاهش می‌یابد. همچنین در این تحقیق از مقادیر درصد حجمی پودر مختلفی استفاده شده است که بهترین خوراک از نظر همگنی و قابلیت تزریق، خوراک با ۶۱ درصد حجمی پودر فلز شناخته شد.

۲- شرح مساله

تولید قطعه سالم با استفاده از فرآیند قالب‌گیری تزریقی پودر فلز وابستگی زیادی به مقدار پودر موجود در خوراک اولیه و همچنین اجزاء سیستم چسب دارد. بدین منظور می‌بایست ضمن استخراج میزان مناسب پودر فلز، انتخاب اجزاء و رسیدن به درصد مناسب هر یک از اجزاء موجود در سیستم چسب انجام گیرد. پارامترهای ذکرشده تابعی از جنس، شکل و اندازه دانه پودر است که مقادیر مناسب آنها در این مقاله برای پودر فولاد کم‌آلیاژ Fe-2Ni استخراج شده‌اند. در تحقیق حاضر، هدف دستیابی به خوراک حاوی سیستم چسب مناسب همراه درصد مناسب اجزاء تشکیل‌دهنده و همچنین استخراج درصد حجمی مناسب پودر فولاد کم‌آلیاژ Fe-2Ni با استفاده از آزمون رئولوژی است.

۳- روش تحقیق

۳-۲- پودر

در تحقیق حاضر از پودر فولاد کم‌آلیاژ Fe-2Ni تهیه‌شده از شرکت Unifine استفاده شده است. ترکیب شیمیایی و چگالی این پودر پایه آهن با توجه به اطلاعات فروشنده در جدول ۱ قابل مشاهده است. با توجه به میزان عناصر آلیاژی آن که کمتر از ۵٪ است، می‌توان پودر مورد استفاده را در دسته فولادهای کم‌آلیاژ در نظر گرفت.

یکی از ویژگی‌های مهم پودر در فرآیند MIM توزیع گسترده دانه‌های پودر است که منجر به ایجاد چگالی بالاتر در قطعه نهایی

بالا تر هستند. خوراک‌های پایه- واکس جزء خوراک‌های نوینی هستند که به دلیل فراوری و روش چسب‌زدایی آسان امروزه یکی از پرکاربردترین ترکیبات مورد استفاده در قالب‌گیری تزریقی پودر به- حساب می‌آیند^[23]. در هر دو نوع خوراک، ابتدا جزء اولیه سیستم چسب توسط چسب‌زدایی حلالی خارج می‌شود. این در حالی است که پلیمر پیکره موجود در ترکیب، وظیفه حفظ شکل و عدم ازهم- پاشیدگی آن را در این مرحله بر عهده دارد. همچنین در آنها حذف جزء اولیه یا همان اضافه‌شونده‌ها، مجاری و خلل و فرجی را ایجاد می‌کند که به خروج گازهای حاصل از تجزیه پلیمر پیکره در مرحله چسب‌زدایی حرارتی کمک می‌کند. در جدول ۲ پلیمرهای مورد استفاده در سیستم چسب به‌کاررفته برای پودرهای مشابه فولاد کم‌آلیاژ Fe-2Ni برای ساخت سیستم‌های چسب همراه مشخصات و نقش آنها قابل مشاهده است.

تنش برشی حین مخلوط‌سازی می‌شود. همچنین کارنا‌باواکس به دلیل زاویه تماس کم و دمای تجزیه وسیع (۲۵۰-۴۴۰°C) می‌تواند به اجزاء دیگر کمک کند-^[20] [22]. اسیداستئاریک نیز به عنوان روان کننده و ترکنده و به منظور بهبود جریان پذیری و روان کنندگی افزوده می‌شود و امکان افزایش میزان بارگذاری پودر را با کاهش گرانشی فراهم می‌سازد. این ماده خصوصیتی از جمله گرانشی پایین، دمای تجزیه بالا، وزن مولکولی پایین (که باعث جلوگیری از ایجاد تنش پسماند و اعوجاج می‌شود)، سازگار با محیط زیست، ارزان و به راحتی حل شدن در حلال‌های آلی را دارد^[23]. در کل خوراک‌ها به دو نوع پایه واکس و پایه پلیمر تقسیم می‌شوند. خوراک‌های پایه- پلیمر از خوراک‌های ابتدایی مورد استفاده در فرآیند MIM هستند که دارای استحکام و دمای ذوب و تجزیه بیشتر و همچنین گرانشی

جدول ۲) مشخصات و وظایف اجزاء سیستم چسب مورد استفاده در این مقاله^[24]

ردیف	نام پیونددهنده		نام اختصاری	وظیفه	درجه حرارت ذوب (°C)	دمای تجزیه یا جوش (°C)	دانسیته (g/cm ³)
	فارسی	لاتین					
۱	پلی‌پروپیلن	Polypropylene	PP	پلیمر پیکره	۱۴۰	۴۷۰-۳۵۰	۰/۹
۲	پارافین‌واکس	Paraffin Wax	PW	افزودنی (فعال‌ساز سطحی)	۶۰-۵۸	۳۲۰-۱۸۰	۰/۹۱
۳	کارنا‌باواکس	Carnauba Wax	CW	افزودنی (فعال‌ساز سطحی)	۹۱-۸۳	۴۴۰-۲۵۰	۰/۹۹
۴	اسیداستئاریک	Stearic Acid	SA	افزودنی (روان کننده و ترکنده)	۷۰/۱	۳۰۶-۲۶۳	۰/۸۶

جدول ۳) ترکیبات مختلف سیستم‌های چسب

ردیف	نام اختصاری	درصد حجمی (vol.%)			
		پارافین‌واکس	پلی‌پروپیلن	کارنا‌باواکس	اسیداستئاریک
۱	FS1 (69PW-20PP-10CW-1SA)	۶۹	۲۰	۱۰	۱
۲	FS2 (55PW-25PP-15CW-5SA)	۵۵	۲۵	۱۵	۵
۳	FS3 (66PW-19PP-10CW-5SA)	۶۶	۱۹	۱۰	۵
۴	FS4 (61PW-18PP-20CW-1SA)	۶۱	۱۷	۲۰	۱
۵	FS5 (57PW-26PP-16CW-1SA)	۵۷	۲۶	۱۶	۱
۶	FS6 (62PW-27PP-5CW6-SA)	۶۲	۲۷	۵	۶
۷	FS7 (68PW-19PP-10CW-3SA)	۶۸	۱۹	۱۰	۳
۸	FS8 (65PW-19PP-15CW-1SA)	۶۵	۱۹	۱۵	۱
۹	FS9 (49PW-22PP-25CW-4SA)	۴۹	۲۲	۲۵	۴
۱۰	FS10 (58PW-26PP-15CW-1SA)	۵۲	۲۳	۱۴	۱
۱۱	FS11 (61PW-28PP-5CW-6SA)	۶۱	۲۸	۵	۶

حین مخلوط‌سازی به صورت تابعی از زمان در دمای ۱۷۰°C ثبت شده‌اند.

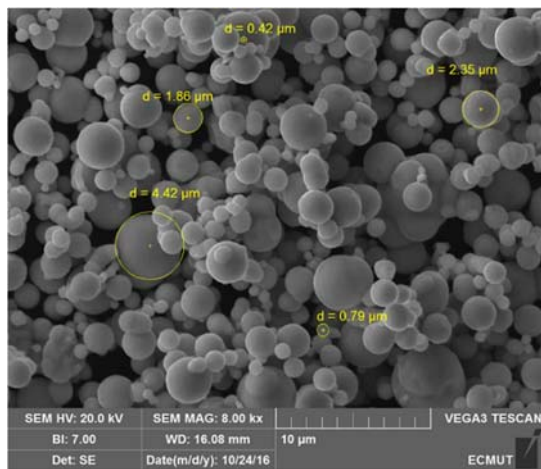
۴-۳- تهیه سیستم چسب و خوراک

به منظور آماده‌سازی سیستم چسب و انجام عملیات اختلاط از مخلوط‌کن برابندر (W50) مجهز به یک جفت پره Z شکل واقع در دانشگاه علم و صنعت پوهانگ (POSTECH) کره جنوبی استفاده شده است. دمای اختلاط بر اساس بیشترین دمای ذوب اجزاء سیستم چسب، برابر با ۱۷۰°C انتخاب شده است که این دما پایین‌تر از دمای تجزیه آنها است. سرعت اختلاط طبق تحقیقات مشابه ۷۵ دور بر دقیقه و زمان اختلاط نیز مطابق با زمان رسیدن

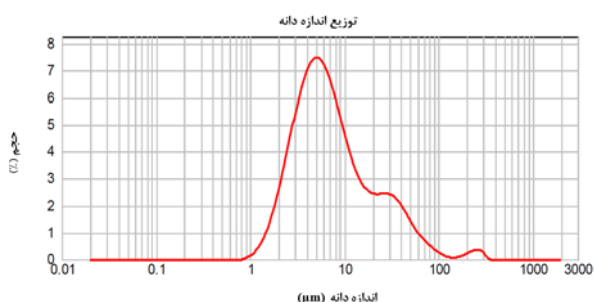
۳-۳- دستیابی به درصد حجمی پودر مناسب

استفاده از خوراک حاوی میزان نامناسب پودر، موجب ایجاد عیوبی مانند ناهمگنی خوراک، جدایش بین دانه‌های پودر و سیستم چسب و همچنین اعوجاج در چسب‌زدایی می‌شود^[25]. بدین منظور، درصد حجمی بحرانی پودر با استفاده از رُومتر گشتاور (Haake PolyLab QC Lab Mixer, Thermo scientific) واقع در دانشگاه علم و صنعت پوهانگ (POSTECH) کره جنوبی استخراج شده است. حین فرآیند، پودر به صورت مرحله‌ای و در هر مرحله به میزان یک درصد حجمی در بازه ۵۲ الی ۶۱ درصد حجمی به سیستم چسب در مخلوط‌کن اضافه شده است. مقادیر گشتاور

برای به کارگیری در قالب گیری تزریقی پودر با هدف افزایش چگالی فشردگی پودر و در نتیجه چگالی قطعه تفجوشی شده تا حد زیادی مناسب می سازد.



شکل ۱) تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر فولاد کم آلیاژ Fe-2Ni مورد استفاده



نمودار ۱) توزیع تجمعی پودر حاصل از آزمون توزیع اندازه ذرات

جدول ۴) توزیع اندازه ذرات و عامل شیب توزیع در مخلوط پودر اولیه

توزیع اندازه پودر مورد استفاده			
D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	S _w
۲/۵۴۶	۶/۴۴۳	۳۳/۶۴۹	۲/۲۸۳۵

۲-۴- آنالیز سیستم چسب

همان طور که ذکر شد، در این مقاله از جریان شناسی گشتاوری و آزمون های رئولوژیکی به منظور تعیین درصد حجمی مناسب پودر فلز و مقدار مناسب اجزاء سیستم چسب استفاده شده است. هنگامی که پره های دوار مخلوط کن با سرعت ثابت می چرخند، تغییرات گشتاور نشان دهنده کار مورد نیاز برای عملیات مخلوط سازی است. بنابراین مقادیر گشتاور حین مخلوط سازی بیانگر مقاومت ماده در برابر تنش های اعمالی یا همان گرانشی مخلوط است. نمودارهای گشتاور برحسب زمان، رئوگرام نامیده می شوند. با استفاده از این نمودارها می توان نحوه مخلوط شدن اجزاء پلیمری، تغییرات کلی گرانشی، رسیدن به حالت پایدار و همگنی آمیزه ها را مورد ارزیابی قرار داد. به عنوان مثال در ادامه به نحوه اختلاط سیستم چسب FS9 (49PW-22PP-25CW-

به خوراک همگن حداکثر ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. همچنین تغییرات میزان گشتاور برحسب زمان حین عملیات اختلاط برای نمونه های مختلف ثبت شد. ترکیبات مختلف سیستم های چسب تهیه شده همراه تغییرات درصد حجمی آنها در جدول ۳ قابل مشاهده است.

به منظور یافتن درصد مناسب اجزاء موجود در سیستم چسب، ارزیابی رئولوژیکی در شرایط یکسان و نسبی روی خوراک های حاوی ۶۰ درصد حجمی پودر فلز انجام گرفت.

۴- نتایج و بحث

در این فصل به بیان نتایج آزمون های صورت گرفته روی ترکیبات مختلف سیستم چسب و پودر فلز حاوی بارگذاری ۶۰ درصد حجمی پودر فلز پرداخته می شود.

۱-۴- آنالیز پودر فولاد کم آلیاژ Fe-2Ni مورد استفاده

شکل ۱ تصویر گرفته شده از پودر مورد استفاده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با مقیاس ۸۰۰۰X واقع در دانشگاه صنعتی مالک اشتر را نشان می دهد. همان طور که در تصویر مشاهده می شود، دانه های پودر دارای هندسه کروی هستند که این موضوع موجب افزایش چگالی و بهبود ریزساختار قطعه نهایی بعد از تفجوشی می شود.

همچنین توزیع تجمعی اندازه ذرات در نمودار ۱ نشان داده شده است. در این نمودار مقادیر D₁₀ و D₉₀ نشان دهنده گستردگی توزیع اندازه ذرات و D₅₀ بیانگر اندازه متوسط ذرات هستند. بیشترین درصد اندازه پودر مربوط به دانه های با اندازه ۷ میکرون است. طبق مطالعات انجام شده در تحقیقات مشابه [26, 27] پودر با شرایط فوق، پودری مناسب به منظور به کارگیری در فرآیند MIM است.

در جدول ۴، توزیع اندازه دانه های پودر و عامل شیب توزیع در مخلوط پودر مورد استفاده در ماده خام اولیه قابل مشاهده است. عامل شیب توزیع یا همان S_w در واقع شیب منحنی توزیع تجمعی نرمال لگاریتمی است که توسط معادله ۶ قابل محاسبه است [11]:

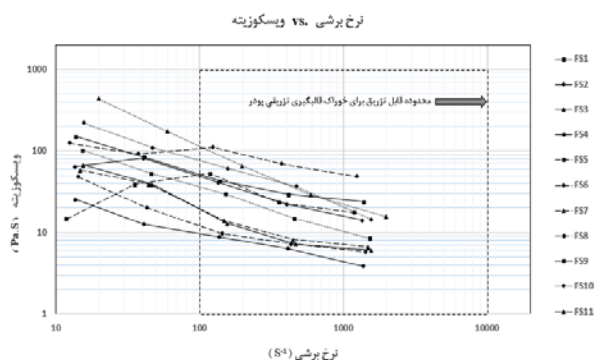
$$S_w = \frac{2.56}{\log \frac{d_{90}}{d_{10}}} \quad (6)$$

از نظر توزیع اندازه ذرات، پودر مناسب برای فرآیند قالب گیری تزریقی، می بایست دارای مقادیر نزدیک به ۲ و در نتیجه توزیع اندازه ذرات وسیع باشد. تحت شرایط مذکور، چگالی فشردگی بالاتر قابل دستیابی بوده و مقدار چسب کمتری برای آماده سازی خوراک مورد نیاز است. از سوی دیگر پودر با مقادیر بالای S_w (بیش از ۷) که دارای توزیع اندازه بسیار باریک است، برای قالب گیری تزریقی مناسب نیستند. در تحقیق سوتوماویر و همکاران [10]، نیز نتیجه مشابه حاصل شده است. طبق رابطه ۶، شیب توزیع برای پودر مورد استفاده در مطالعه حاضر برابر با ۲/۲۸۳۵ است. بنابراین پودر مورد استفاده در مقاله حاضر دارای شیب توزیع قابل قبول بوده که آن را

می‌دهند که ترکیب حاوی بیشترین میزان واکس و اسیداستئاریک (FS4) گرانروی بسیار کمی داشته به گونه‌ای که این موضوع حتی عملیات مخلوط‌سازی و همگن کردن آن را با مشکل مواجه ساخته است. خروج اجزاء مذاب سامانه مذکور از فواصل موجود در قسمت‌های مختلف مخلوط‌کن که هنگام انجام عملیات اختلاط مشاهده شده است نیز از دیگر نشانه‌های گرانروی بسیار پایین آن محسوب می‌شود. این رفتار همچنین طی اختلاط پلی‌اتیلن چگالی بالا (HDPE) و مقادیر زیاد پارافین‌واکس در تحقیق ویلما و همکاران [5] نیز گزارش شده است. از آنجایی که قالب‌گیری تزریقی پودر فرآیندی با اعمال فشار تزریق نسبتاً بالا محسوب می‌شود، رفتار سیلانی سیستم چسب و خوراک و همچنین تراکم‌پذیری پودر هنگامی که در حالت مذاب و تحت تنش برشی قرار دارند، عواملی تعیین‌کننده و کلیدی به‌منظور ارزیابی واقعی عکس‌العمل آنها حین فرآیند محسوب می‌شوند. بنابراین، بررسی داده‌های رئولوژیکی و بالاکس گرانروی، یک ابزار مهم برای تخمین عملکرد خوراک از نظر توانایی پرکردن قالب است. بدین منظور گرانروی به‌صورت تابعی از نرخ برش اندازه‌گیری و ثبت شده است. نتایج آزمون‌های رئولوژیکی و نحوه تغییرات لگاریتم گرانروی برحسب لگاریتم نرخ برش برای سیستم‌های چسب مختلف در دمای 170°C است، در نمودار ۳ نمایش داده شده است.

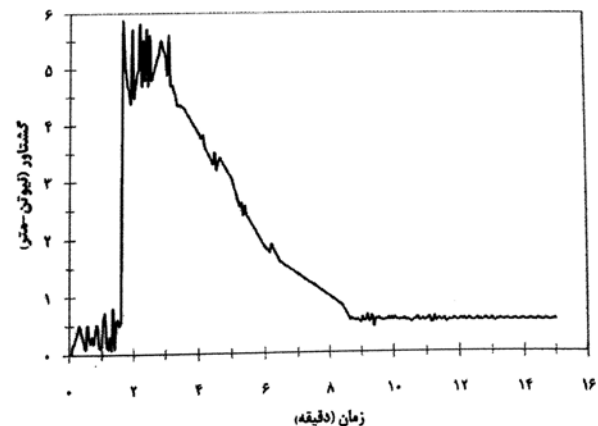
جدول (۵) مقدار گشتاور حالت پایدار خوراک‌ها

ردیف	نوع خوراک	مقدار گشتاور حالت پایدار (N.m)
۱	FS1	۱/۷۲
۲	FS2	۱/۲۵
۳	FS3	۰/۴
۴	FS4	۰/۲
۵	FS5	۱/۴۴
۶	FS6	۲/۷
۷	FS7	۰/۴۳
۸	FS8	۰/۳۶
۹	FS9	۰/۶۸
۱۰	FS10	۱/۳۳
۱۱	FS11	۱/۳۹



نمودار (۳) تغییرات گرانروی به‌ازای نرخ برش برای سیستم‌های چسب با درصد اجزاء مختلف

4SA) که رئوگرام مربوط به آن در نمودار ۲ نشان داده شده است، پرداخته می‌شود.



نمودار (۲) تغییرات گشتاور برحسب زمان حین مخلوط‌سازی ترکیب FS9

در عملیات مخلوط‌سازی اجزاء سیستم چسب، به‌منظور جلوگیری از تبخیر مواد با دمای ذوب پایین‌تر در اثر زمان زیاد، به‌ترتیب دمای ذوب از بیشترین به کمترین ابتدا پلی‌پروپیلن، سپس کارناباواکس، بعد از آن اسیداستئاریک و در انتها نیز پارافین‌واکس به محفظه افزوده شدند که در نهایت پس از ذوب کامل اجزاء سیستم چسب، پودر فلز به آن افزوده شده است. همان‌گونه که از نمودار تغییرات گشتاور برحسب زمان قابل تشخیص است، با افزودن پلی‌پروپیلن، مقادیر گشتاور حین مخلوط‌سازی به‌دلیل مقاومت ماده پیش از ذوب کامل افزایش می‌یابد. سپس، گشتاور با گذشت زمان و مخلوط‌شدن مناسب اجزاء مذاب، کاهش یافته و شرایط پایدار که همراه با عدم تغییر گشتاور با زمان است و همگن شدن مخلوط را نشان می‌دهد، ایجاد می‌شود. به بیان دیگر، ابتدا گشتاور با ورود مواد جدید دارای پیک بالایی بوده و زمانی که اختلاف پیک‌ها به حداقل برسد و توزیع نمودار به‌صورت یکنواخت شود به این معنی است که ترکیبی همگن از پودر و پلیمر حاصل شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، در بازه زمانی بین ۳ تا ۹ دقیقه، نمودار یک افت شدید را نشان می‌دهد که نشانگر نزدیک‌شدن به همگن‌شدن مواد اولیه است. همچنین قسمتی از این نوسانات به‌علت افزودن مواد در هر مرحله است.

در نمودار ۲، میزان گشتاور حالت پایدار مهم‌ترین داده است که رابطه مستقیم با گرانروی خوراک‌های ساخته‌شده دارد، به‌طوری که پایین‌بودن میزان گشتاور حالت پایدار، نشان از پایین‌بودن گرانروی خوراک دارد. در جدول ۵، مقدار گشتاور حالت پایدار خوراک‌های تولیدشده قابل مشاهده است.

همان‌گونه که در رئوگرام خوراک‌های تولیدشده از سیستم چسب با درصد‌های مختلف اجزاء قابل مشاهده است، با افزایش میزان اسیداستئاریک، پارافین‌واکس و کارناباواکس، مقدار گشتاور حالت پایدار که متناسب با میزان گرانروی ترکیب مورد نظر است، کاهش می‌یابد. بررسی‌ها حین آزمون‌های مخلوط‌سازی نشان

ترکیب‌های FS5، FS6 و FS11 که با افزایش و یا کاهش عامل حساسیت به نرخ برش همراه است، مشاهده می‌شود. در شرایط اشباع این چنینی امکان جدایش واکس و اسیداستئاریک از پلی‌پروپیلن وجود دارد که می‌تواند منجر به افزایش اثر لغزش دیواره و کاهش رفتار شبه‌پلاستیک شود. لازم به ذکر است همان‌طور که در جدول ۶ آورده شده است، مقدار n یا حساسیت به نرخ برش برای خوراک FS11 که کمترین مقدار را دارا است و در مرحله بررسی خواص رئولوژیکی به‌علت نداشتن شرایط تزریق حذف شد، ۲۷٪ بوده است که نشان‌دهنده تغییرات سریع گرانروی این خوراک نسبت به تغییرات نرخ برش است و مؤید نامناسب بودن خواص رئولوژیکی خوراک به‌دلیل عدم پایداری در مقادیر مختلف نرخ برشی است. از بین شش خوراک باقی‌مانده دیگر نیز، طبق اندازه‌گیری‌ها و محاسبات گرانروی و ضرایب حساسیت به نرخ برش (n)، خوراک FS3 که از گرانروی همراه مقدار n کمتری نسبت به دیگر خوراک‌ها برخوردار است و موجب تسهیل در فرآیند تزریق خوراک و در نتیجه تولید قطعات بی‌نقص و سالم (حتی در قطعات دارای هندسه پیچیده) می‌شود، به‌عنوان خوراک مناسب در این مقاله انتخاب شد.

در این مرحله و پس از ارزیابی رفتار رئولوژیکی خوراک‌های متشکل از سیستم چسب با درصد اجزاء مختلف، درصد مناسب حجمی پودر فلز برای خوراک برگزیده در مرحله قبل، استخراج می‌شود.

جدول ۶) تغییرات مقدار حساسیت به نرخ برش برای خوراک‌های مختلف

نام اختصاری خوراک	مقدار n
FS1	۰/۶
FS2	۰/۶۲
FS3	۰/۴۳
FS4	۰/۶۱
FS5	۰/۹۹
FS6	۰/۸۱
FS7	۰/۴۹
FS8	۰/۵۴
FS9	۰/۶۲
FS10	۰/۴۳
FS11	۰/۲۷

۴-۳- محاسبه درصد حجمی بحرانی پودر فلز

گشتاور مخلوط‌سازی برحسب زمان و همچنین گشتاور متوسط برای تمامی درصدهای حجمی پودر در نمودار ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است، تا قبل از رسیدن به درصد حجمی ۵۸، مقادیر گشتاور متوسط به‌صورت خطی با افزایش درصد حجمی پودر فلز زیاد شده است. پس از رسیدن به مقدار ۵۸ درصد حجمی پودر، شیب خط به‌دلیل اصطکاک بین دانه‌های پودر در اثر ازدیاد پودر و کاهش سیستم چسب به‌صورت ناگهانی تغییر کرده است. در این تغییر شیب که در تحقیق /وه و

از داده‌های موجود در نمودار ۳، مشاهده می‌شود که میزان گرانروی با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار غیرنیوتنی یا شبه‌پلاستیک خوراک‌ها است. این خاصیت برای پرشدن قالب تحت اعمال تنش‌های برشی و همچنین کمترین میزان پاشش در قالب مطلوب است که در تحقیق *هانسروو* و همکاران^[2] نیز مشاهده شده است. بدین معنی که با اعمال تنش برشی و حرارت در ماشین تزریق، مقدار گرانروی خوراک کاهش یافته و این امر ضمن ایجاد سیلان کافی در محفظه قالب، موجب می‌شود که خوراک به‌راحتی به شکل مورد نظر درآید. از سوی دیگر، به‌محض پرشدن قالب و حذف تنش برشی، گرانروی مجدداً افزایش یافته و با انجماد مخلوط پودر-پلیمر، شکل قطعه به درستی حفظ می‌شود.

همان‌گونه که در توضیحات مربوط به رئوگرام‌ها بیان شد، با توجه به چهارجذئی بودن ترکیب سیستم چسب مورد استفاده، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پلی‌پروپیلن که نقش پلیمر پیکره را ایفا می‌کند و پلیمری با ساختار مولکولی طولانی است، گرانروی خوراک افزایش پیدا می‌کند. همچنین به‌دلیل گرانروی کمتر واکس‌ها، زمانی که کارناباواکس و پارافین‌واکس افزایش پیدا کرده‌اند گرانروی کمتر شده است، اما در نهایت اسیداستئاریک بیشترین نقش را در کاهش گرانروی ایفا کرده است. *سوتوماپور* و همکاران^[11]، مقادیر گرانروی برای قالب‌گیری تزریقی موفقیت‌آمیز را کمتر از ۱۰۰ Pa.s در فاصله نرخ‌های برش بین ۱۰۰ S⁻¹ الی دانسته‌اند. بنابراین از نظر رئولوژیکی، نتایج نشان می‌دهد که همه خوراک‌ها قابلیت تزریق در این بازه را دارند. نکته جالب در این باره این است که پارافین‌واکس هنگامی که به‌طور تنها مورد آزمون جریان‌سنجی قرار می‌گیرد، رفتار کاملاً نیوتنی از خود بروز می‌دهد؛ به این معنی که با افزایش نرخ برش، گرانروی آن تغییری ننموده و ثابت باقی می‌ماند^[5]. همچنین با بررسی روند تغییرات گرانروی برحسب نرخ برش مشخص می‌شود که خوراک‌های FS2، FS5 و FS6 رفتار غیرنیوتنی ندارند و برای تزریق مناسب نیستند.

مقدار n یا همان ضریب حساسیت به نرخ برش (جدول ۶) از شیب نمودار ۳ محاسبه شده است. مقدار n متناسب با میزان رفتار شبه‌پلاستیک است و برای سیالات نیوتنی معادل یک است. تغییرات مقدار حساسیت به نرخ برش برای خوراک‌های تولیدشده در جدول ۶ قابل مشاهده است.

هر چند پارافین‌واکس، کارناباواکس و اسیداستئاریک موجب کاهش گرانروی خوراک، افزایش تکرارپذیری و تسهیل فرآیند پرشدن قالب می‌شوند، ولی مقادیر زیاد آنها نیز در ترکیب خوراک‌ها توصیه نمی‌شود. از اصلی‌ترین مشکلات ناشی از این پدیده می‌توان به گرانروی بسیار پایین و غیرقابل کنترل حین قالب‌گیری و افزایش احتمال تغییر شکل قطعه هنگام حذف پلیمرها در مرحله چسب‌زدایی اشاره نمود. در تحقیق کونگ و همکاران^[26] نیز نتیجه مشابه حاصل شده است. همچنین مطابق داده‌های جدول ۶، کاهش چشمگیر در رفتار شبه‌پلاستیک در

خروج اجزاء مذاب سامانه مذکور از فواصل موجود در قسمت‌های مختلف مخلوط‌کن که هنگام انجام عملیات اختلاط مشاهده شده است نیز از دیگر نشانه‌های گرانیوی بسیار پایین این خوراک محسوب می‌شود.

۴- رفتار غیرنیوتنی در همه خوراک‌ها به‌جز خوراک‌های FS5، FS2 و FS6 که محتوای واکس و اسیداستئاریک در آنها زیاد است، مشاهده شد. می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن افزودنی‌های چگالی‌پایین با ساختار مولکولی سبک به سیستم چسب موجب نزدیک شدن رفتار خوراک به حالت نیوتنی می‌شود.

۵- خواص رئولوژیکی خوراک‌های مناسب برای MIM، گرانیوی زیر 1000 Pa.S در بازه نرخ برشی 100 الی 10000 S^{-1} است تا بتوان آن خوراک را تزریق کرد. بالابودن میزان حساسیت به نرخ برش که نشان‌دهنده عدم پایداری خوراک در نرخ‌های برشی مختلف است، از معایب آنها به‌شمار می‌آید که بر این اساس، در بررسی‌های رئولوژیکی از نظر گرانیوی و میزان حساسیت به نرخ برش، خوراک‌های FS5، FS6 و FS11 از میان خوراک‌های انتخابی حذف شدند.

۶- نهایتاً از بین خوراک‌های باقی‌مانده، خوراک FS3 حاوی ۶۶٪ پارافین‌واکس، ۱۹٪ پلی‌پروپیلن، ۱۰٪ کارناباواکس و ۵٪ اسیداستئاریک دارای کمترین گرانیوی و کمترین حساسیت نسبت به نرخ برش است که منجر به پرکردن کامل حفره قالب و تولید قطعه سالم، حتی برای هندسه‌های بسیار پیچیده می‌شود.

۷- به‌منظور مقایسه خوراک‌ها در شرایط نسبی ابتدا همه خوراک‌ها در حالت دارای ۶۰ درصد حجمی پودر فلز با یکدیگر مقایسه شدند. پس از رسیدن به درصد مناسب اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم چسب، درصد حجمی بحرانی پودر فلز با استفاده از آزمون جریان‌سنجی گشتاوری به‌میزان ۵۸ درصد حجمی محاسبه شد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

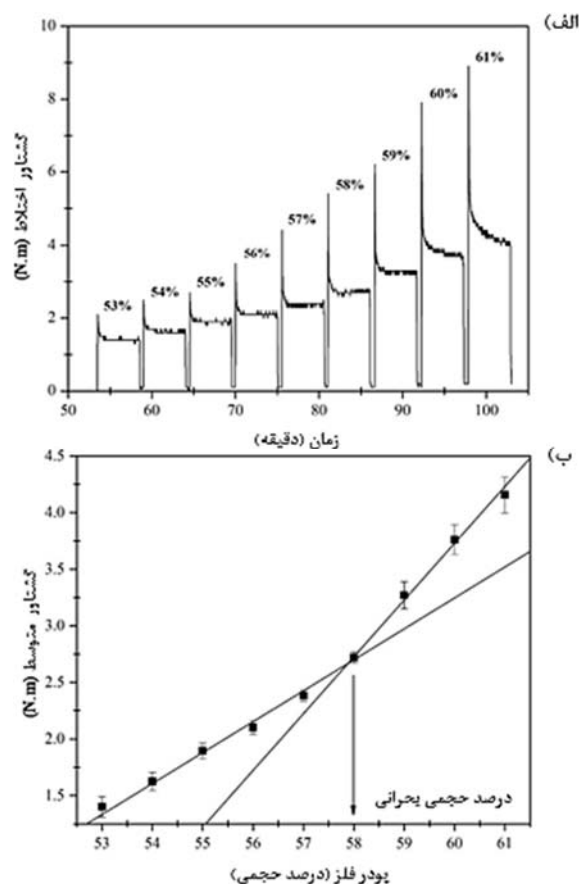
سهم نویسندگان: علی عسکری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ محمدحسین علائی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ علی مهدی‌پور عمرانی (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری (۱۵٪)؛ خانعلی نکویی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه (۱۵٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Huang B, Liang S, Qu X. The rheology of metal injection molding. Journal of Materials Processing Technology. 2003;137(1-3):132-137.
- 2- Hausnerová B, Marcaníková L, Filip P, Sába P. Optimization of powder injection molding of feedstock based on aluminum oxide and multicomponent water-soluble polymer binder. Polymer Engineering & Science. 2011;51(7):1376-1382.
- 3- Macosko CW. Rheology: Principles, measurements,

همکاران^[25] نیز مشاهده شده است، نشان‌دهنده رسیدن به مقدار درصد حجمی بحرانی در خوراک موجود است.



نمودار ۴) محاسبه درصد حجمی بحرانی پودر؛ الف) تغییرات گشتاور مخلوط‌سازی برحسب زمان، ب) مقادیر گشتاور متوسط در درصد‌های مختلف حجمی پودر

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، آمیزه‌هایی متشکل از ترکیبات مختلف خوراک با درصد اجزاء مختلف سیستم چسب تهیه و سپس رفتار رئولوژیکی آنها مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت. از جمله نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- وجود گستره وسیعی از اندازه ذرات و قرارگرفتن ذرات کوچک در فضاهای خالی بین ذرات درشت پودر، موجب بهبود قابلیت فشردگی و همچنین کاهش گرانیوی در نرخ‌های برش بالا می‌شود.

۲- در سیستم چسب چهارجزئی پلی‌پروپیلن، پارافین‌واکس، کارناباواکس و اسیداستئاریک، دو پلیمر پارافین‌واکس و اسیداستئاریک با اهدافی نظیر ترساز و روان‌کننده اضافه شده‌اند و گرانیوی خوراک و در نتیجه گشتاور مخلوط‌سازی خوراک را پایین می‌آورند.

۳- بررسی‌ها حین آزمون‌های مخلوط‌سازی نشان داد که ترکیب حاوی بیشترین میزان واکس و اسیداستئاریک (FS4) گرانیوی بسیار کمی داشته به‌گونه‌ای که این موضوع حتی عملیات مخلوط‌سازی و همگن کردن آن را با مشکل مواجه ساخته است.

powders using thermosetting binder. Powder Metallurgy. 2000;43(3):233-237.

16- Lin KH. Wear behavior and mechanical performance of metal injection molded Fe-2Ni sintered components. Materials & Design. 2011;32(3):1273-1282.

17- Urval R, Lee S, Atre SV, Park SJ, German RM. Optimisation of process conditions in powder injection moulding of microsystem components using a robust design method: part I. primary design parameters. Powder Metallurgy. 2008;51(2):133-142.

18- Omar MA, Subuki I. Sintering characteristics of injection moulded 316L component using palm-based biopolymer binder. In: Shatokha V, editor. Sintering- Methods and Products. Unknown City: IntechOpen; 2012.

19- Sclavons M, Laurent M, Devaux J, Carlier V. Maleic anhydride-grafted polypropylene: FTIR study of a model polymer grafted by ene-reaction. Polymer. 2005;46(19):8062-8067.

20- Moballegheh L, Morshedien J, Esfandeh M. Copper injection molding using a thermoplastic binder based on paraffin wax. Materials Letters. 2005;59(22):2832-2837.

21- Rei M, Milke EC, Gomes RM, Schaeffer L, Souza JP. Low-pressure injection molding processing of a 316-L stainless steel feedstock. Materials Letters. 2002;52(4-5):360-365.

22- Li YM, Liu XQ, Luo FH, Yue JL. Effects of surfactant on properties of MIM feedstock. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007;17(1):1-8.

23- Liu ZY, Loh NH, Tor SB, Khor KA, Murakoshi Y, Maeda R. Binder system for micropowder injection molding. Materials Letters. 2001;48(1):31-38.

24- Brandrup J, Immergut EH, Grulke EA, Abe A, Bloch DR, Editors. Polymer handbook. Hoboken: John Wiley & Sons; 1999.

25- Oh JW, Lee WS, Park SJ. Investigation and modeling of binder removal process in nano/micro bimodal powder injection molding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;97:4115-4126.

26- Kong X, Barriere T, Gelin JC. Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding. Journal of Materials Processing Technology. 2012;212(11):2173-2182.

27- Khakbiz M, Simchi A, Bagheri R. Analysis of the rheological behavior and stability of 316L stainless steel-TiC powder injection molding feedstock. Materials Science and Engineering: A. 2005;407(1-2):105-113.

and applications. New York: Wiley-VCH; 1994.

4- Hidalgo J, Jiménez-Morales A, Torralba JM. Torque rheology of zircon feedstocks for powder injection moulding. Journal of the European Ceramic Society. 2012;32(16):4063-4072.

5- Thomas-Vielma P, Cervera A, Levenfeld B, Várez A. Production of alumina parts by powder injection molding with a binder system based on high density polyethylene. Journal of the European Ceramic Society. 2008;28(4):763-771.

6- Reddy JJ, Ravi N, Vijayakumar M. A simple model for viscosity of powder injection moulding mixes with binder content above powder critical binder volume concentration. Journal of the European Ceramic Society. 2000;20(12):2183-2190.

7- Ibrahim MH, Muhamad N, Sulong AB. Rheological investigation of water atomised stainless steel powder for micro metal injection molding. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2009;4(1):1-8.

8- Agote I, Odriozola A, Gutierrez M, Santamaria A, Quintanilla J, Coupelle P, et al. Rheological study of waste porcelain feedstocks for injection moulding. Journal of the European Ceramic Society. 2001;21(16):2843-2853.

9- Li Y, Li L, Khalil KA. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. Journal of Materials Processing Technology. 2007;183(2-3):432-439.

10- Sotomayor ME, Várez A, Levenfeld B. Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316 L powder injection moulding feedstocks. Powder Technology. 2010;200(1-2):30-36.

11- Sotomayor ME, Levenfeld B, Várez A. Powder injection moulding of premixed ferritic and austenitic stainless steel powders. Materials Science and Engineering: A. 2011;528(9):3480-3488.

12- Chhabra RP. Bubbles, drops, and particles in non-Newtonian fluids (Chemical Industries). 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press; 2006.

13- German RM, Bose A. Injection molding of metals and ceramics. Princeton: Metal Powder Industries Federation; 1997.

14- Haw PL, Muhamad N, Murthadha H. The characterization and flow behavior of 316L stainless steel feedstock for Micro Metal Injection Molding (μ MIM). Applied Mechanics and Materials. 2011;44-47:2872-2876.

15- Levenfeld B, Gruzza A, Várez A, Torralba JM. Modified metal injection moulding process of 316L stainless steel