



Fabrication of Zirconia Crucible Using Low-Pressure Injection Molding Process & Investigation of Effective Parameters

Jaber Mirzaei ¹, Danial Ghafoori ^{2*}, Hamidreza Zareei ³

¹ Instructor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences & Techniques, Tehran, Iran

² Chief Executive Officer, Nogara Ceram Fanavar Company, Materials & Energy Research Institute Growth Center, Karaj, Iran

³ Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences & Techniques, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: daniel74.ghafoori@gmail.com

Paper History:

Received: 2023-06-09

Revised in revised form: 2023-07-10

Scientific Accepted: 2023-09-10

Keywords:

Low Pressure Injection Molding

Zirconia

Paraffin Wax

Debinding

Feedstock

Abstract: In this article, Low-Pressure Injection Molding (LPIM) method was investigated as a method for forming zirconia (zirconium oxide) parts. It is one of the methods used for manufacturing engineering ceramics with complex shapes & high dimensional accuracy. In this method, a binder composition (paraffin & industrial waxes) is used as the plasticizing agent to shape zirconia particles. Different parameters such as temperature, pressure & injection time, mold temperature, etc. have been found to be effective in shaping the ceramic parts based on this method. Throughout this research, these parameters were examined, & their optimal values were obtained. The optimal injection temperature was in the range of 80-90 Celsius degree, injection pressure in the range of 3-5 bar, & injection time in the range of 10-15 seconds to form a crucible with the size of 130×85×75 mm (height×internal diameter×external diameter). This study also examined the FESEM images of the microstructure of parts in the injected, debonded, & sintered bodies. According to the findings, the zirconia crucible in this article shows notable similarity with the crucible made by Zircoa company with the code 3001 in terms of physical properties such as bulk density & apparent porosity.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2023.401435.1280>

URL: https://www.jamt.ir/article_181478.html

1. INTRODUCTION

To prevent the failure of the ceramic parts, zirconium oxide powder is partially or fully stabilized in a high-temperature structure. For this purpose, dopants such as MgO (Ikuma, 1986; Muccillo et. al, 2004), CaO (Imran et. al, 2015), Y2O3 (Chen et. al, 2010), & CeO2 (Duh et. al, 1986) are used as the stabilizing agents.

The Mg-PSZ refractory has already become one of the most valuable industrial materials owing to its corrosion resistant, excellent chemical, & thermomechanical properties (Suk et. al, 2009). Nevertheless, the potentials of the full exploitation of these advantages can only be realized if the final products have the required specifications namely the desired phase, density, microstructure, & bend strength (Koley et. al, 2011).

Due to the size of these parts, the conventional method for making zirconia crucibles is cold isostatic pressing. Since the pressure in this method is applied to the part in an elastomer mold, the part will be

characterized by higher uniformity & strength (Farmer et. al, 2006). However, due to the high investment cost of this type of press, alternative forming methods were searched for to find an inexpensive method with low investment cost yet similar performance (Farmer et. al, 2006).

One of these methods that ensures high uniformity & strength for the ceramic parts is the injection molding method, which is considered as one of the wet processing methods & since air pressure is applied, it compacts the part into the mold, thus ensuring the part uniformity (Rak et. al, 2000). In general, there are two types of injection molding methods: 1) High-Pressure Injection Molding (HPIM) & 2) Low-Pressure Injection Molding (LPIM).

LPIM functions based on the application of thermoplastic organic compounds, which become fluid at rather lower temperatures, e.g., 60–70 °C. The major component of this binder system is paraffin wax, which melts at this low temperature. Since the ceramic polymer



compositions based on paraffin have rather low viscosity & good fluidity, very high softness & plastic properties at rather low temperatures, these compositions require only low pressures (0.2–0.7 MPa) to force them to fill the mold cavities (Leverkoehne et. al, 2001; Nogueira et. al, 2001]. In this case, a ceramic powder is mixed & plasticized with this paraffin-based binder system at 60-70 °C, & the prepared composition is injected (cast) into the metallic molds. When the mold is cooled down, a solidified green body is ejected from it. Followed by the binder removal (debinding or dewaxing), the ceramic body is fired for the required density. This method & its major principles were developed in the 1950s-1960s by P.O. Gribovsky in the former Soviet Union. When first proposed, the mentioned method was named ‘hot casting’ or ‘hot casting of thermoplastic slurries’. Optimization of this technology allowed for the production of different ceramic components for different applications on the high-volume industrial basis for years (Bauer et. al, 2002; Knitter et. al, 2001; Krindges et. al, 2008).

2. MATERIALS & METHODS

To make zirconia crucible, monoclinic zirconia powder (Zirconia ZCO-E3, IMERYS fused minerals yingkou) with the average particle size of 3 micron & purity of more than 98.5%, fused magnesia powder with the purity of 97.5% (IRP FM 97.5T, IRREP Co., Iran) & particle size of less than 10 µm, alumina with the average particle size of 4 µm, & silica with an average particle size of 5 µm were used. Moreover, paraffin wax, industrial wax, & acetic acid were used in the binder composition.

3. RESULTS & DISCUSSION

3.1. The effect of injection time on mold filling

One of the important parameters in injection molding is the holding time of air pressure. If the selected time is short, the feed will not fill the mold well, & even if it is filled, it will cause other problems such as holes, microcracks, etc. As shown in Figure (a), the effect of time was evaluated at the constant temperature & pressure. Upon increasing the time from 1 up to 5 seconds, the volume percentage of the material injected into the mold will increase from about 20 up to 100%. Upon further increasing the time up to 10 seconds, the part will be in its final shape without any holes, cracks or welding lines. Prolonging the time up to more than 10 seconds heats up the mold & delays the cooling process. However, this will not cause a problem in prototyping but in industrial production, the time of each injection should be reduced as much as possible due to the high volume of production. Therefore, it can be concluded that 10 seconds is found to be the optimal time for this piece. Figure 1(b) shows the cross-section of a piece that was not optimal in terms of time. Many holes can be detected in this piece, & each of these holes can ultimately lead to the destruction of the sample after the baking process. This problem cannot be observed in Figure 1(c), indicating the correct choice of mold filling time.

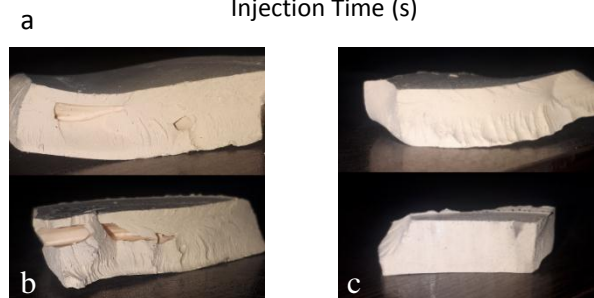
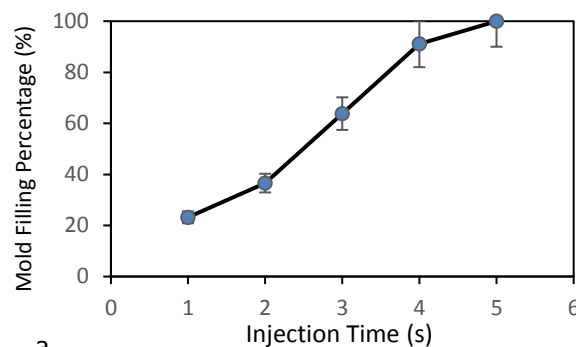


Figure 1. a) The effect of injection time on filling the mold at the pressure of 4 bar & temperature of 90°C, b) The presence of holes inside the piece, & c) The piece without holes

4. ACKNOWLEDGEMENT

The authors of this article are grateful to Nogara Ceram Fanavar Company for using its laboratory facilities.

5. REFERENCES

- Bauer, W., & Knitter, R. (2002). Development of a Rapid Prototyping Process Chain for the Production of Ceramic Microcomponents. *Journal of Materials Science*, 37, 3127-3140. <https://doi.org/10.1023/A:1016150126206>
- Chen, C.C., Cheng, W.Y., Lu, S.Y., Lin, Y.F., Hsu, Y.J., Chang, K.S., Kang, C.H., & Tung, K. L. (2010). Growth of zirconia and yttria-stabilized zirconia nanorod arrays assisted by phase transition. *CrystEngComm*, Vol 12(11), 3664-3669. <https://doi.org/10.1039/c000728e>
- Duh, J. G., Dai, H. T., & Hsu, W. Y. (1988). Synthesis & sintering behaviour in CeO₂-ZrO₂ ceramics. *Journal of Materials Science*, 23(8), 2786-2791. <https://doi.org/10.1007/BF00547451>
- Farmer, S., C., Schoenlein, L. H., & Heuer, A. H. (1983). Precipitation of Mg₂Zr₅O₁₂ in MgO-Partially-Stabilized ZrO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 66(7), c107-c109. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb10600.x>
- Ikuma, Y., Yoshimura, A., Ishida, K., & Komatsu, W. (1986). Phase transformation and toughening in MgO dispersed with ZrO₂. In *Tailoring Multiphase and Composite Ceramics*. Springer. 295-304. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-2233-7_22
- Imran, A., Alam, S., Irfan, M., & Farooq, M. (2015). Micro Structural Study of Plasma-sprayed Zirconia-CaO Thermal Barrier Coatings. *Materials Today: Proceedings*, 2(10), 5318-5323. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.043>
- Knitter, R., Bauer, W., Göhring, D., & Haubelt, J. (2001). Manufacturing of ceramic microcomponents by a rapid prototyping process chain. *Advanced Engineering Materials*, 3(1-2), 49-54. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200101\)3:1/2<49::AID-ADEM49>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200101)3:1/2<49::AID-ADEM49>3.0.CO;2-H)
- Koley, S., Ghosh, A., Sahu, A.K., Tewari, R., & Suri, A. K. (2011). Correlation of compaction pressure, green density, pore size distribution and sintering temperature of a nano-crystalline 2Y-TZP-Al₂O₃ composite. *Ceramics International*, 37(3), 731-739. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.11.003>
- Krindges, I., Andreola, R., Perottoni, C. A., & Zorzi, J. E. (2008). Low-pressure injection molding of ceramic springs. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5(3), 243-248. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02226.x>

10. Leverkoehne, M., Coronel-Hernandez, J., Janssen, R., Claussen, N., Dirscherl, R., & Gorlov, I. (2001). Novel Binder System Based on Paraffin- Wax for Low- Pressure Injection Molding of Metall–Ceramic Powder Mixtures, *Advanced Engineering Materials*, 3(12), 995-998. [http://dx.doi.org/10.1002/1527-2648\(200112\)3:12%3C995::AID-ADEM995%3E3.0.CO;2-D](http://dx.doi.org/10.1002/1527-2648(200112)3:12%3C995::AID-ADEM995%3E3.0.CO;2-D)
11. Nogueira, R., et al., "Low-Pressure Injection Molding of Alumina Ceramics Using a Carnauba Wax Binder: Preliminary Results", *Journal of Key Engineering Materials*, Vol 189-191, (2001), 67-72. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.67>
12. Muccillo, E.N.S., Tadokoro, S.K., & Muccillo, R. (2004). Physical characteristics & sintering behavior of MgO-doped ZrO₂ nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 301-305. <https://doi.org/10.1023/B:NANO.0000034742.45278.2f>
13. Quevedo Nogueira, R. E. F., Bezerra, A. C., dos Santos, F. C., Sousa, M. R. D., & Acchar, W. (2001). Low-pressure injection molding of alumina ceramics using a carnauba wax binder: preliminary results. *Key Engineering Materials*, 89, 67-72. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.67>
14. Rak, Z.S. (2000). Advanced shaping techniques in advanced ceramics. In CFI (Ceramic Forum International/Berichte der DKG) (Vol. 77). Available from: <http://zircoa.com/product.coarse.grain/crucible.zirconia.html>
15. Suk, M. O., & Park, J. H. (2009). Corrosion behaviors of zirconia refractory by CaO-SiO₂-MgO- CaF₂ slag, *Journal of the American Ceramic Society*, 92(3), 717-723.



ساخت بوت‌ه زیرکونیایی با استفاده از فرایند قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین (LPIM) و بررسی مؤلفه‌های مؤثر

جابر میرزایی^۱، دانیال غفوری^{۲*}، حمیدرضا زارعی^۳

^۱مدرس، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

^۲مدیرعامل، شرکت نوگرا سرام فناور، مرکز رشد پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹

دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹

پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

کلیدواژه‌ها:

قالب‌گیری تزریقی در فشار پایین

زیرکونیا

پارافین وکس

چسب‌زدایی

خوراک

چکیده در این مقاله روش قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین (LPIM) به‌عنوان روش شکل‌دهی قطعات زیرکونیایی (اکسید زیرکونیوم) مورد بررسی قرار گرفته است. این روش یکی از روش‌های ساخت سرامیک‌های مهندسی با شکل‌های پیچیده و دقت ابعادی بالاست. در این روش از یک ترکیب چسب (پارافین وکس + موم صنعتی) به‌عنوان عامل پلاستیک جهت شکل‌دهی آسان ذرات زیرکونیا استفاده شد. مؤلفه‌های متفاوتی نظیر دما، فشار و زمان تزریق، دمای قالب و... در شکل‌دهی قطعات سرامیکی به‌روش قالب‌گیری تزریقی در فشار پایین اثرگذار است. بررسی این مؤلفه‌ها و انتخاب مقدار بهینه آن‌ها در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. دمای بهینه تزریق در محدوده ۹۰-۸۰ درجه سلسیوس، فشار بهینه در محدوده ۵-۳ بار و زمان تزریق در محدوده ۱۵-۱۰ ثانیه برای شکل‌دهی بوت‌ه با ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۷۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۸۵ میلی‌متر به‌دست آمد. بررسی تصاویر از ریزساختار قطعات در حالت‌های تزریق‌شده، چسب‌زدایی‌شده و زیت‌شده در این مقاله انجام شد. همچنین مشخص شد بوت‌ه زیرکونیایی در این پژوهش از نظر خواص فیزیکی نظیر چگالی حجمی و تخلخل ظاهری با بوت‌ه ساخته‌شده توسط شرکت Zircoa با شناسه ۳۰۰۱ تشابه خوبی دارد.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2023.401435.1280>

URL: https://www.jamt.ir/article_181478.html

۱- مقدمه

ترمو مکانیکی عالی به یکی از بهترین مواد دیرگداز تبدیل شده است (Suk et al., 2009). با این وجود، استفاده از این ویژگی‌ها زمانی محقق می‌شود که محصول نهایی دارای مشخصات مورد نیاز شامل فاز، چگالی، ریزساختار و استحکام خمشی باشد (Koley et al., 2011).

روش مرسوم ساخت بوت‌ه‌های زیرکونیایی به‌دلیل بزرگی این قطعات، پرس ایزواستاتیک سرد است. در این روش چون فشار به‌صورت همه‌جانبه به قطعه وارد می‌شود، یکنواختی و استحکام بالاتری به‌دست می‌آید (Famer et al., 1983). اما به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری بالا برای این نوع پرس، نگاه به روش‌های شکل‌دهی جایگزین، برای یافتن روشی ارزان‌قیمت

برای محافظت از قطعات زیرکونیایی در برابر شکست، پودر اکسید زیرکونیوم به‌طور جزئی یا کامل در یک ساختار با دمای بالا تثبیت می‌شود. بدین منظور از موادی نظیر اکسید منیزیم (MgO) (Ikuma et al., 1986; Muccillo et al., 2004) اکسید کلسیم (CaO) (Imran et al., 2015) اکسید ایتریوم (Y₂O₃) (Chen et al., 2010) و اکسید سربیم (CeO₂) (Duh et al., 1988) استفاده می‌شود.

دیرگداز Mg-PSZ (زیرکونیای پایدارشده با منیزیا) به دلیل مقاومت در برابر خوردگی، خواص شیمیایی و

*عهده‌دار مکاتبات: دانیال غفوری

ایران، البرز، کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

پیام نگار: daniel74.ghafoori@gmail.com

ارتفاع قطر خارجی \times قطر داخلی) و با حجم تزریق ۱۹۸/۳۴ سانتی‌متر معکب (تقریباً دوبرابر بیشترین حجم قابل تزریق) است. که با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی ساخته شده است. ساخت قطعات سرامیکی با این ابعاد در هیچ مقاله یا سایر منابع مطالعاتی دیده نشده و می‌توان گفت اولین باری است که شکل‌دهی بوته سرامیکی با این ابعاد به‌جای روش پرس ایزواستاتیک سرد، به روش قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین، ساخته شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

برای ساخت بدنه‌های زیرکونیایی، از پودر زیرکونیای مونوکلینیک (Zirconia ZCO-E3, IMERYS fused minerals) با میانگین اندازه ذرات ۱/۲ میکرومتر و خلوص بیش از ۹۸/۵ درصد (جدول ۱)، پودر منیزیای ذوبی با خلوص ۹۷/۵ درصد (IRP FM 97.5T, IRREP Co., Iran) با دانه‌بندی کوچک‌تر از ۲ میکرومتر، آلومینا با متوسط اندازه ذرات ۱ میکرومتر (SRM30, Hindalco)، خلوص ۹۹/۶ درصد و سیلیس با متوسط اندازه ذرات ۰/۵ میکرومتر (خلوص ۹۹/۸۵، سیلیس همدان) استفاده شد. همچنین در ترکیب چسب از پارافین وکس (پارافین وکس با درصد چربی ۵ درصد، البرز پارافین)، موم صنعتی و اسید استئاریک (گرید ۱۸۰۱، KLKOLEO) (جدول ۲) استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات پودر زیرکونیا

ZCO-E3	شناسه زیرکونیا
مونوکلینیک	حالت فازی
بالای ۹۸/۵	درصد زیرکونیا (ZrO_2)
۰/۰۸	درصد کلسیا (CaO)
۰/۵۰	درصد آلومینا (Al_2O_3)
۰/۸۰	درصد سیلیس (SiO_2)
۰/۰۸	درصد اکسید آهن (Fe_2O_3)
۰/۲۲	درصد اکسید تیتانیوم (TiO_2)
۰/۰۲	درصد منیزیا (MgO)

و با هزینه سرمایه‌گذاری کم، ولی با عملکرد مشابه، مورد توجه قرار گرفته است (Farmer et al., 1983). یکی از این روش‌ها که یکنواختی و استحکام بالا برای قطعات ایجاد می‌کند، روش قالب‌گیری تزریقی است که به‌عنوان یکی از روش‌های فرآوری تر محسوب شده و به‌دلیل استفاده از فشار باد، قطعه را درون قالب منسجم می‌کند و یکنواختی قطعه را به‌همراه خواهد داشت (Rak, 2000). به‌طورکلی، دو نوع روش قالب‌گیری تزریقی وجود دارد: ۱) قالب‌گیری تزریقی با فشار بالا^۱ ۲) قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین^۲.

روش قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین، مبتنی بر استفاده از ترکیبات آلی گرمانرم است که در دمای کم‌تر (۷۰-۶۰ درجه سلسیوس) سیال می‌شوند. جزء اصلی این ترکیب آلی، پارافین وکس است که در این دمای کم، ذوب می‌شود. از آنجاکه ترکیبات چسب-سرامیک بر پایه پارافین، دارای سیالیت بالا هستند، به فشارهای کم‌تری (۱/۷-۰/۰ مگاپاسکال) برای پر کردن قالب نیاز دارند (Leverkoehne, 2001; Nogueira et al., 2001) پس از نرم‌شدن پارافین در دمای ۷۰-۶۰ درجه سلسیوس، مخلوط خاصیت پلاستیک خود را به‌دست می‌آورد و سپس به داخل قالب جریان می‌یابد. وقتی قالب خنک شد، یک بدنه خام جامد از قالب خارج می‌شود. بدنه سرامیکی پس از حذف چسب، به‌منظور دستیابی به استحکام نهایی زینتر می‌شود. این روش و اصول اصلی آن در دهه ۱۹۶۰-۱۹۵۰ میلادی در روسیه معرفی شد. در آن زمان نام این روش، ریخته‌گری داغ^۳ یا ریخته‌گری داغ دوغاب گرمانرم^۴ بود. بهینه‌سازی این روش، امکان تولید قطعات سرامیکی مختلف را در ابعاد صنعتی فراهم کرد. (Bauer and Knitter, 2001; Knitter et al., 2001; Krindges et al., 2008)

در این پژوهش از قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین استفاده شده است. بیشترین بُعد سرامیک ساخته‌شده با روش قالب‌گیری تزریقی ۱۰۰ میلی‌متر و بیشترین حجم تزریق برای یک قطعه سرامیکی ۱۰۰ سانتی‌متر معکب است و به‌طورکلی، این روش برای قطعات کوچک و با پیچیدگی بالا استفاده می‌شود (Gadow and Kern, 2014). نوآوری اصلی این مقاله، ساخت بوته زیرکونیایی با ابعاد بزرگ ۱۳۰×۸۵×۷۵ میلی‌متر

¹ High Pressure Injection Molding

² Low Pressure Injection Molding

³ Hot Casting

⁴ Hot Casting of Thermoplastic Slurries

جدول ۲. مشخصات و درصد اجزای چسب مورد استفاده

نوع چسب	دمای ذوب (درجه سلسیوس)	درصد وزنی (%)	خاصیت
پارافین وکس	۷۵	۸۵	سیال‌ساز و جداکننده قطعات تزریق شده
موم صنعتی	۶۲-۶۵	۱۰	کاهش گران‌روی با افزودن به پارافین وکس
اسید استتاریک	۷۵	۵	عامل ترساز و کاهش‌دهنده گران‌روی

۲-۲- فرایندهای آزمایشگاهی

چگالی کلی و تخلخل ظاهری قطعات، به روش ارشمیدس ASTM C134-C135 اندازه‌گیری شد. سطح شکست نمونه‌ها برای بررسی عمق قطعه زیرکونیایی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی^۱ (FESEM) (مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN از بنیاد ملی رازی) مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به تغییرات وزنی در مرحله چسب‌زدایی از آنالیز توزین حرارتی^۲ (TGA) (مدل Q600 ساخت شرکت TA آمریکا از شرکت بیم‌گستر تابان) استفاده شد. برای انجام این آزمایش، یک نمونه ۱۰ میلی‌گرمی از قطعه تزریق شده برداشته شد و در یک ظرف پلاتین استاندارد قرار داده و از ۱۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه تحت گاز آرگون قرار داده شد. نمودار هیستریزس مربوط به توزیع اندازه ذرات با استفاده از نرم‌افزار Image J و Minitab رسم شد. لازم به ذکر است که قطعه موردنظری که بررسی مؤلفه‌ها روی آن انجام شد، یک بوته زیرکونیایی با ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۷۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۸۵ میلی‌متر است. شکل دهی این قطعه با دستگاه قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین (۲/۵ لیتری) ساخت شرکت نوگرا سرام فناور که در شکل (۱) آورده شده، انجام شده است.



شکل ۱. دستگاه قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین ساخت شرکت نوگرا سرام فناور

۲-۲-۱- تهیه خوراک

اولین مرحله در تهیه خوراک، آماده‌سازی پودر سرامیکی است. بدین منظور ترکیبات زیرکونیا، منیزیا، آلومینا و سیلیس با مقادیری که در جدول (۳) ذکر شده، توزین می‌شوند. علت استفاده از این مقادیر افزودنی، دستیابی به خواص بوته زیرکونیایی ساخت شرکت Zircoa با شناسه ۳۰۰۱ [شرکت زیرکوا] است که برای ذوب و ریخته‌گری سوپراآلیاژهای پایه نیکل استفاده می‌شود. سپس به منظور اختلاط همگن، به‌وسیله آسیاب ماهواره‌ای یا جارمیل تحت آسیاب تر (استون) قرار می‌گیرند. در این مرحله به منظور پخش یکنواخت روان‌ساز در میان ذرات پودری، اسید استتاریک اضافه می‌شود. پس از گذشت ۲ ساعت از آسیاب، دوغاب به‌دست آمده درون آن قرار می‌گیرد تا در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس کاملاً خشک شده و آماده مراحل بعدی شود. در شکل (۲) ریزساختار و توزیع اندازه ذرات پودر ترکیب شده، قابل مشاهده است.

در مرحله دوم، پودر سرامیکی تهیه شده، با استفاده از یک همزن سیاره‌ای دوتیغه در دمای ۹۰-۷۵ درجه سلسیوس با پارافین مخلوط شده و در نهایت خوراک موردنظر به‌دست می‌آید. پس از آماده‌سازی خوراک لازم است تا حباب‌های به‌وجودآمده در حین اختلاط از بین برود که برای این کار از یک پمپ خلأ استفاده می‌شود. پس از حباب‌زدایی، خوراک به‌دست‌آمده خنک می‌شود و قبل از سفت شدن کامل، به‌صورت دستی به تکه‌های ۲ تا ۳ سانتی‌متری تقسیم شده و آماده مرحله تزریق می‌شود. در هنگام تزریق این تکه‌ها را داخل مخزن دستگاه تزریق ریخته و ذوب می‌شوند و از آن برای پر کردن قالب استفاده می‌شود.

شکل (۲-الف)، تصویر FESEM از ترکیب پودر زیرکونیا پس از فرایند خشک‌کاپش است که با اندازه‌گیری ذرات و رسم نمودار (۲-ب)، میانگین اندازه ذرات، ۱/۲۶۱ میکرومتر به‌دست آمد.

¹Field Emission Scanning Electron Microscopy

²Thermal Gravimetric Analysis

جدول ۳. ترکیب پودر استفاده شده

عنصر	زیرکونیا	منیزیا	آلومینا	سیلیس
درصد وزنی	۹۵/۵	۲/۲	۰/۸	۱/۵

اثرگذارند. از بین این پارامترها زمان تزریق (۵-۰ ثانیه)، فشار تزریق (۵-۱ بار) و دمای تزریق (۷۰-۱۰۰ درجه سلسیوس) است. در شکل (۴) فرایند تزریق سرامیک زیرکونیایی به صورت طرح‌واره آورده شده است.

۳-۲-۲- فرایند چسب‌زدایی

فرایند چسب‌زدایی قطعات تزریق شده به شکل ۳ مختلف قابل انجام است:

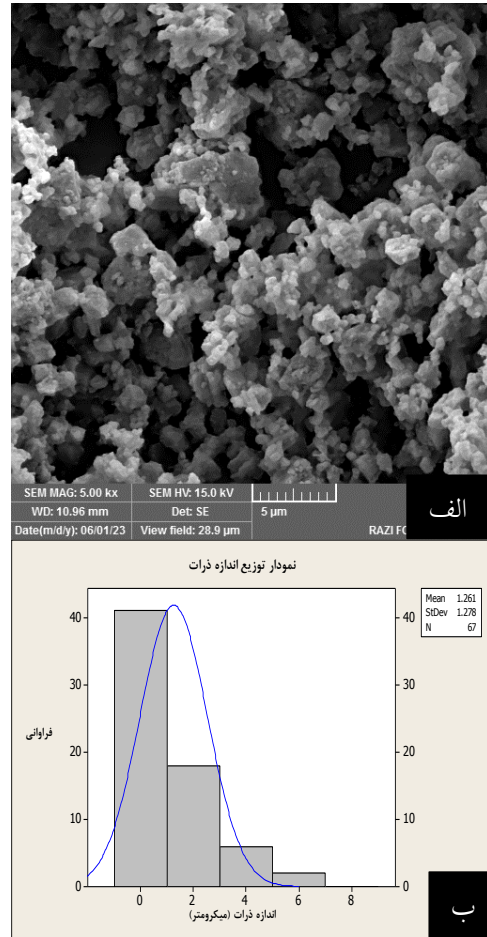
۱. حرارتی
۲. با استفاده از حلال
۳. با استفاده از کاتالیست

چسب‌زدایی حرارتی مرسوم‌ترین این روش‌هاست. در این روش حذف چسب باید با سرعت کم انجام شود تا قطعه سرامیکی تحت تنش‌های ناشی از خروج چسب دچار ترک و درنهایت تخریب نشود. به منظور جلوگیری از اتفاقات مخرب، فرایند چسب‌زدایی قطعه سرامیکی در بستر یک جاذب انجام می‌شود. بدین ترتیب که بدنه‌های تزریق شده در یک بستر پودر، غوطه‌ور شده و با استفاده از نیروهای موئین، چسب توسط پودر، جذب شده و درنهایت تبخیر می‌شود.

فرایند چسب‌زدایی حرارتی قطعات سرامیکی ساخته شده به روش قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین، به ۶ مرحله زیر تقسیم می‌شود:

(۱) در گرم کردن چسب‌های بر پایه پارافین، اجزای روغنی که بیشتر در پارافین‌های صنعتی مشاهده می‌شود، در دمای ۵۰-۶۰ درجه سلسیوس شروع به خروج می‌کنند که اصطلاحاً به آن تعریق می‌گویند. این مرحله به آرامی و با سرعت ۵-۱۰ درجه سلسیوس بر ساعت انجام می‌شود. اگر این مرحله با همین سرعت انجام شود، استحکام مکانیکی قطعه سرامیکی بالاتر خواهد بود.

(۲) مرحله بعدی گرمایش، دمای ۱۵۰-۱۰۰ درجه سلسیوس است که با سرعت ۱۰-۵ سلسیوس بر ساعت انجام می‌شود که پارافین، ذوب شده و به داخل جاذب حرکت می‌کند و فرایند تجزیه شروع می‌شود. در پایان این مرحله، دما به مدت معینی ثابت در نظر گرفته می‌شود تا فرصت کافی برای خروج چسب فراهم شود.



شکل ۲. (الف) تصویر FESEM از ترکیب پودر زیرکونیا، (ب)

نمودار توزیع اندازه ذرات از ترکیب پودر زیرکونیا

۳-۲-۲- تزریق خوراک

به منظور تزریق خوراک زیرکونیا (به صورت پوته) از یک قالب آلومینیومی دوتکه که تصاویر آن در شکل (۳) آورده شده است؛ استفاده شد. بدین منظور خوراک را به داخل محفظه دستگاه قالب‌گیری تزریقی انتقال داده و دمای آن را بالا می‌برند تا مذاب شود (۸۰-۱۰۰ درجه سلسیوس). سپس با استفاده از فشار هوا (۱/۷-۰/۱ مگاپاسکال) خوراک به داخل قالب آلومینیومی تزریق می‌شود. با سرد شدن قالب، بدنه خام تشکیل شده، خارج می‌شود. عوامل مختلفی از جمله ترکیب چسب گرمانرم، نسبت جامد (پودر سرامیکی) به فاز مایع (سیستم چسب)، زمان تزریق مناسب برای پر کردن قالب، فشار تزریق، دمای تزریق، فرایند حذف چسب و زیتر نهایی بر خواص و عملکرد قطعه سرامیکی نهایی

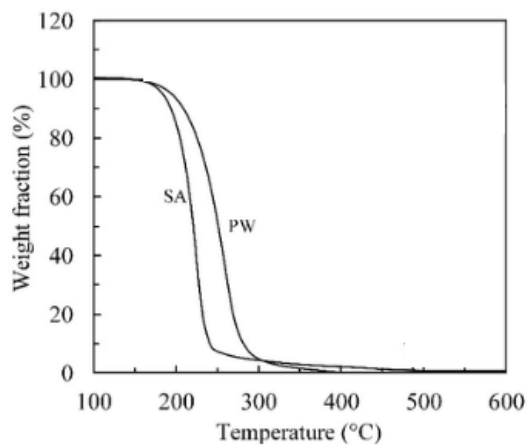
درصد می‌رسد.

(۴) تجزیه هیدروکربن‌های باقی‌مانده در وسط بدنه و سوزاندن آن‌ها در محدوده دمایی ۴۰۰-۳۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. در این مرحله نرخ دما به ۲۰-۱۰ درجه سلسیوس بر ساعت افزایش می‌یابد.

(۵) مرحله نهایی چسب‌زدایی در محدوده دمایی ۱۰۰۰-۸۵۰ درجه سلسیوس به منظور استحکام بخشی به بدنه خام انجام می‌شود.

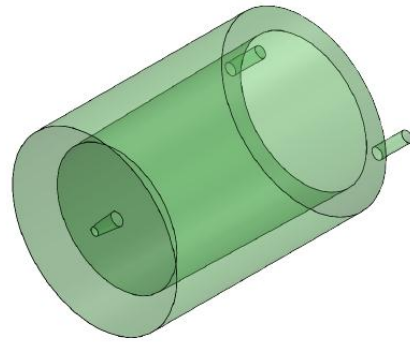
(۶) سرد کردن قطعات بعد از چسب‌زدایی، سریع انجام می‌شود؛ زیرا سرامیک، دارای تخلخل کم و بیش بالایی است، اما به اندازه کافی مستحکم است تا بارهای مکانیکی و حرارتی را تحمل کند (Zorzi et al., 2014; Gorjan et al., 2014; Cetinel et al., 2011; Gorjan et al., 2012) and Gorjan et al., 2003).

در شکل (۵) نمودار TGA برای پارافین وکس و اسید استتاریک آورده شده است. در محدوده دمایی ۳۰۰-۱۵۰ درجه سلسیوس کم‌وبیش تمامی ترکیب چسب حذف می‌شود و در این محدوده، کنترل دمای چسب‌زدایی برای جلوگیری از ایجاد هرگونه ترک در قطعه امری ضروری است.

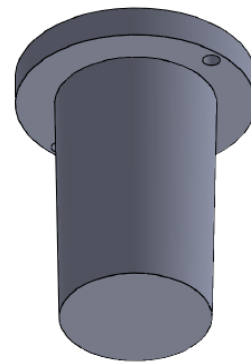


شکل ۵. نمودار TGA برای ترکیب چسب PW: پارافین وکس و SA: اسید استتاریک

نمودار حرارتی چسب‌زدایی برای قطعات زیرکونیایی بزرگ در مقایسه با قطعات کوچک، بسیار متفاوت است. در شکل (۶) ترک به وجود آمده در بوته زیرکونیایی پس از چسب‌زدایی، قابل مشاهده است. افزایش زمان چسب‌زدایی به حدود ۳۰ ساعت، مشکل ترک‌ها را حل کرد.

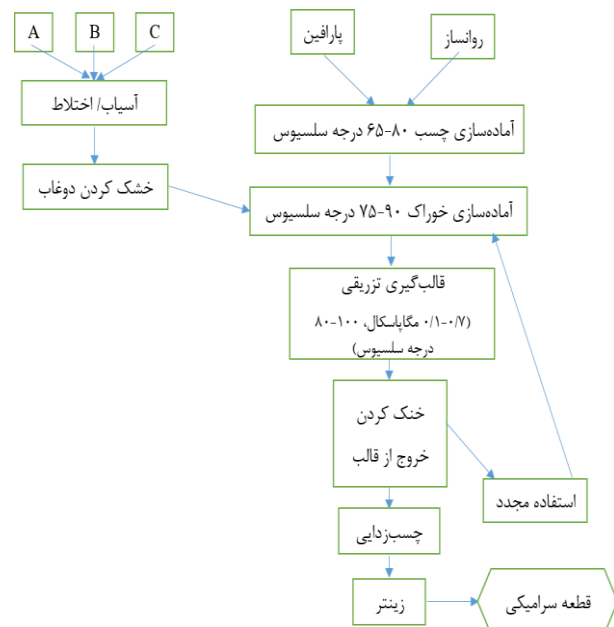


(الف)



(ب)

شکل ۳. قالب دوتکه بوته زیرکونیایی



شکل ۴. طرح‌واره ساخت قطعات زیرکونیایی به روش قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین (Cetinel et al., 2011)

(۳) در این مرحله پارافین ذوب شده در محدوده دمایی ۱۵۰-۳۰۰ درجه سلسیوس تجزیه شده و در نهایت تبخیر می‌شود. در پایان این مرحله، میزان تجزیه پارافین به ۹۵-۹۰

۳- نتایج و بحث

در فرایند قالب‌گیری تزریقی، مؤلفه‌های فشار، زمان تزریق، دمای تزریق و دمای قالب حائز اهمیت است. از این رو، به منظور قالب‌گیری بهتر باید تمام این مؤلفه‌ها در حالت بهینه قرار گیرد. در ادامه به بررسی تأثیر این عوامل بر شکل‌دهی سرامیک در روش قالب‌گیری تزریقی پرداخته خواهد شد.

۳-۱- تأثیر زمان تزریق بر پر کردن قالب

یکی از عوامل مهم در قالب‌گیری تزریقی، زمان نگهداری فشار باد (عامل تزریق) است. اگر زمان انتخاب شده کم باشد، خوراک به خوبی قالب را پر نمی‌کند و در صورت پر کردن هم مشکلاتی نظیر حفرات، ریزترک‌ها و... را ایجاد خواهد کرد (Gorjan et al., 2014). همان‌طور که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است اثر زمان در دما و فشار ثابت مورد ارزیابی قرار گرفت. با افزایش زمان از ۱ تا ۵ ثانیه، درصد حجمی ماده تزریق‌شده در قالب از حدود ۲۰ به ۱۰۰ درصد افزایش یافت. با افزایش زمان به ۱۰ ثانیه، قطعه به شکل نهایی خود بدون هیچ‌گونه حفره، ترک یا خط جوشی^۱ خواهد رسید. علت افزایش زمان به ۱۰ ثانیه، وجود یک سری حفره و تخلخل در قطعه در زمان ۵ ثانیه است که با افزایش زمان به ۱۰ ثانیه این مسئله حل شد. افزایش بیش از این مقدار باعث داغ شدن قالب شده و عمل خنک کردن را به تعویق می‌اندازد. این اتفاق در نمونه‌سازی خللی ایجاد نخواهد کرد؛ اما در تولید صنعتی به دلیل حجم بالای تولید، باید زمان هر تزریق تا حد ممکن کاهش یابد. بنابراین زمان ۱۰-۱۵ ثانیه برای این قطعه، زمان بهینه است. در تصویر (۸-ب) سطح مقطع قطعه‌ای که از نظر زمانی بهینه نبوده، قابل مشاهده است. حفرات متعددی در این قطعه دیده می‌شود که در نهایت، هر کدام از این حفرات می‌تواند منجر به تخریب نمونه پس از فرایند پخت شود. این مشکل در تصویر (۸-ج) دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده انتخاب درست زمان پر کردن قالب است.

۳-۲- تأثیر فشار تزریق بر چگالی خام (قطعه تزریق شده)

افزایش فشار تزریق باعث افزایش سرعت تزریق ماده به داخل قالب شده و در نتیجه قالب سریع‌تر پر خواهد شد

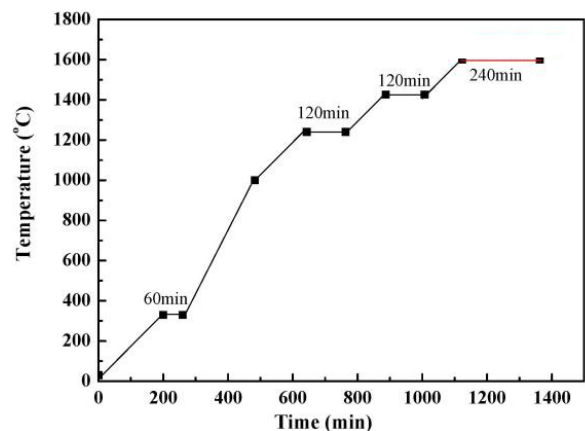


شکل ۶. ترک‌های به وجود آمده در حین فرایند چسب‌زدایی

۴-۲-۲- زینتر

هدف از انجام فرایند زینتر تبدیل بدنه فشرده شده بعد از چسب‌زدایی به بدنه نهایی است. دمای زینتر قطعات زیرکونیایی بیشتر در محدوده ۱۷۰۰-۱۵۵۰ درجه سلسیوس خواهد بود (Rahaman, 2014).

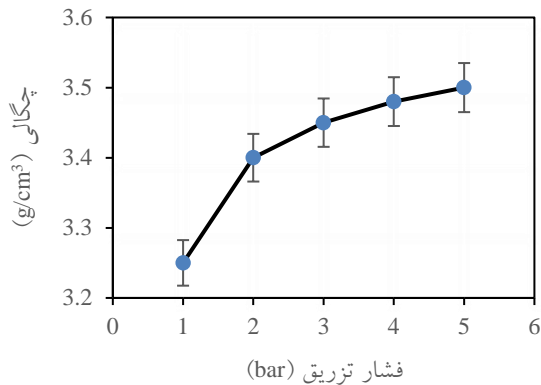
باتوجه به درصد زیرکونیا در بدنه اصلی که ۹۵/۵ است، دمای زینتر آن ۱۶۵۰ درجه سلسیوس انتخاب و در این دما به مدت ۴ ساعت نگه داشته شد. در شکل (۷) نمودار حرارتی زینتر بوتله زیرکونیایی آورده شده است.



شکل ۷. نمودار حرارتی زینتر بوتله زیرکونیایی

(Jiang et al., 2016)

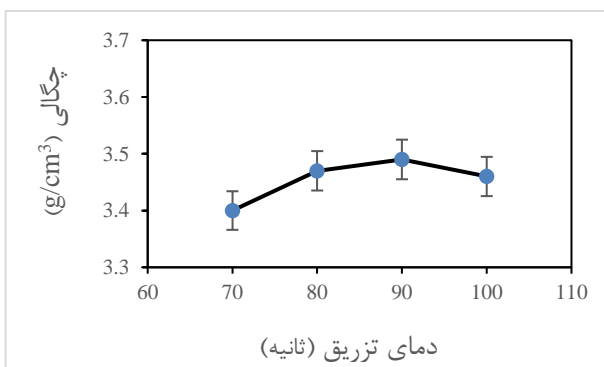
¹ Welding Line



شکل ۹. تأثیر فشار تزریق بر چگالی قطعه پس از تزریق (۹۰ درجه سلسیوس، ۱۰ ثانیه)

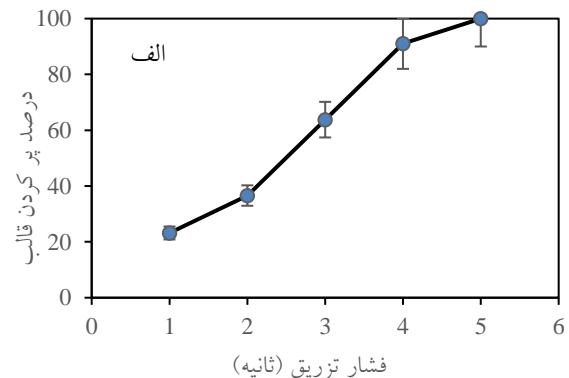
۳-۳- تأثیر دمای تزریق بر چگالی خام (قطعه تزریق شده)

افزایش دمای تزریق در جریان‌یابی آن و پر کردن قالب به‌خصوص برای اشکال پیچیده و بزرگ تأثیر مثبت دارد. (Sardarian et al., 2017; Medvedovski et al., 2012). زمانی که دمای تزریق از ۷۰ به ۹۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد، درصد تخلخل کاهش یافته و چگالی نمونه خام (تزریق شده) افزایش می‌یابد. (Medvedovski et al., 2012) با افزایش دما به ۱۰۰ درجه سلسیوس، پارافین شروع به تبخیر می‌کند و بنابراین، این دما و بالاتر از آن برای انجام تزریق توصیه نمی‌شود. (Medvedovski et al., 2012; Sardarian et al., 2017) همچنین کاهش چگالی در دمای بالای ۹۰ درجه سلسیوس به دلیل افزایش سرعت انقباض ماده در داخل قالب، منجر به ایجاد حفره و تخلخل در ماده می‌شود. تأثیر دمای تزریق بر چگالی بدنه تزریق شده در نمودار شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. تأثیر دمای تزریق بر چگالی قطعه پس از تزریق (فشار ۵ بار، ۱۰ ثانیه)

(Sardarian et al., 2017). در قطعات پیچیده، افزایش فشار بر فرایند تزریق اثرگذار خواهد بود. با افزایش فشار تزریق، سرعت انقباض ماده در داخل قالب نیز کاهش یافته و در این صورت قطعه نهایی بدون حفره‌های انقباضی و با چگالی خام بالاتر تشکیل می‌شود. باین‌حال، افزایش فشار تزریق تنها در محدوده ۳-۵ بار مؤثر است و در فشارهای بالاتر، چگالی افزایش نخواهد یافت (Gorjan et al., 2014) (شکل ۹). زمان نگهداری این فشار روی قالب به شکل و مواد اولیه سرامیکی بستگی دارد؛ زمان‌های نگهداری طولانی، بیشتر برای قطعات بزرگ‌تر استفاده می‌شود. اگر زمانی برای نگهداری فشار نباشد یا کوتاه باشد، احتمال حضور حفره در قطعه و کاهش چگالی آن وجود دارد. به این پدیده اثر فواره‌ای^۱ می‌گویند (Gonzalez-Gutierrez et al., 2012; Medvedovski et al., 2012).



شکل ۸. الف) تأثیر زمان تزریق بر پر کردن قالب در فشار ۴ بار و دمای ۹۰ درجه سلسیوس، ب) وجود حفرات در داخل قطعه (زمان نگهداری: ۵ ثانیه) ج) قطعه بدون حفره (زمان نگهداری: ۱۰ ثانیه)

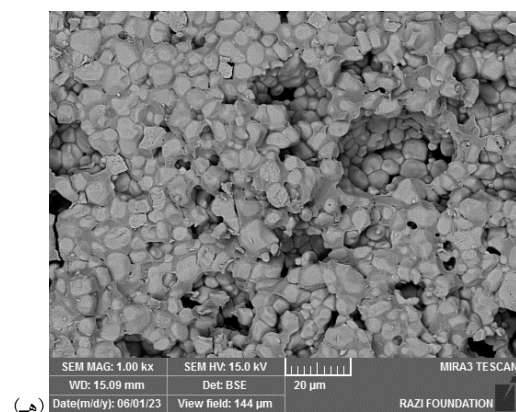
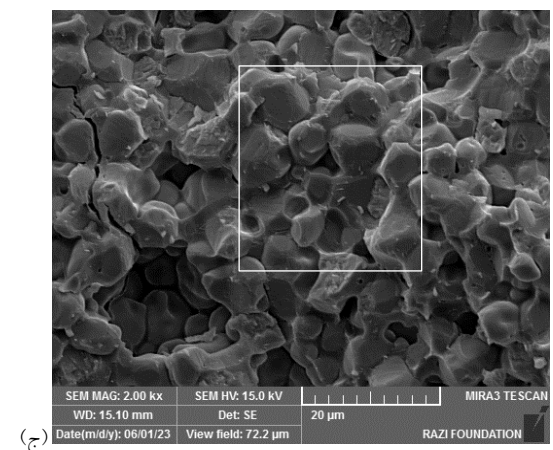
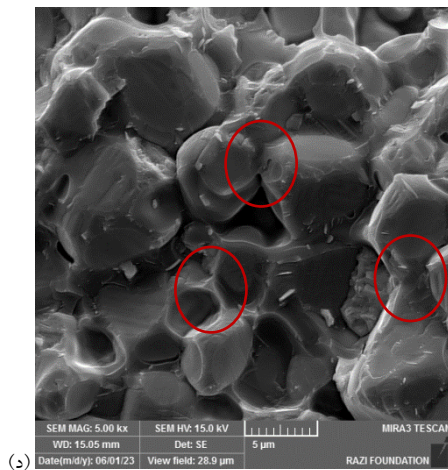
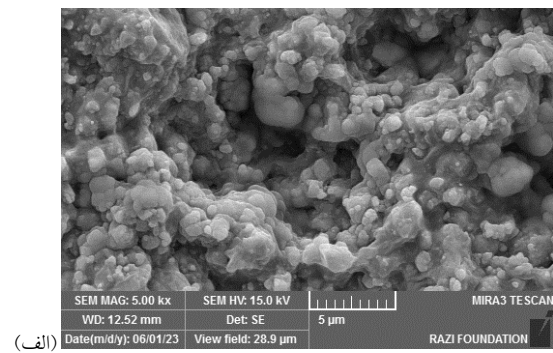
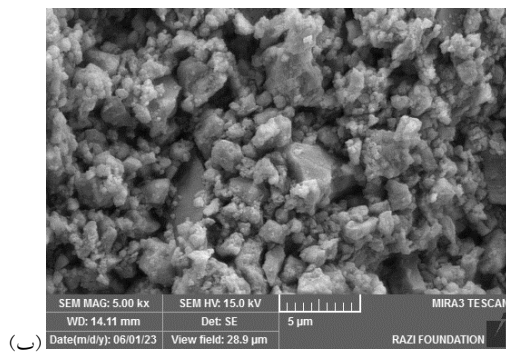
دمای تزریق نیز بر فشار موردنیاز برای پر کردن قالب مؤثر است. جهت تعیین تأثیر فشار بر چگالی خام قطعه، دما ثابت و ۹۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. همچنین زمان نگهداری فشار روی قالب، ۱۰ ثانیه منظور شد.

¹ Jetting effect

۳-۴- ریزساختار

متصل‌اند که اتصال ضعیفی است. در تصویر (۱۱-ج)، به‌کمک تشکیل فاز مذاب (ترکیب منیزیا، آلومینا و سیلیس) در فرایند زینتر و تشکیل مناطق گلویی‌شدن (مناطق قرمز رنگ در تصویر ۱۱-د)، ذرات زیرکونیا در کنار هم قرار می‌گیرند و اتصال محکمی برقرار می‌کنند. حضور منیزیا با ایجاد فاز انتقالی شیشه‌ای باعث آرایش بهتر، فشردگی مؤثرتر ذرات و بهبود چگالی می‌شود (Garrido et al., 2004). در تصویر (۱۱-ه) نیز تشکیل مناطقی که دور ذرات زیرکونیا را به‌وسیله تشکیل فاز مذاب پر کرده‌اند، قابل مشاهده است. همچنین مقایسه بین دو تصویر (۱۱-ب و ج) نشانگر رشد بیشتر دانه‌ها و به‌هم پیوستگی آن‌ها در تصویر (ج) نسبت به (ب) است.

در شکل (۱۱)، ریزساختار نمونه تزریق‌شده زیرکونیایی (الف)، نمونه زیرکونیایی پس از چسب‌زدایی (ب) و نمونه زیرکونیایی پس از زینتر در دمای ۱۶۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت (ج)، قابل مشاهده است. در تصویر (۱۱-الف) فاز چسبنده پارافین که ذرات زیرکونیا را در کنار هم نگه‌داشته، مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر (۱۱-الف و ب) و گرد بودن بیشتر ذرات و همچنین به‌هم پیوستگی بیشتر آن‌ها در تصویر (۱۱-الف)، حضور فاز چسبنده قابل ملاحظه است. در تصویر (۱۱-ب) نمونه‌ای خام و بدون چسب مشاهده می‌شود که ذرات زیرکونیا و افزودنی‌های دیگر در برخی نقاط به‌هم



شکل ۱۱. الف) ریزساختار قطعه تزریق‌شده، ب) ریزساختار پس از چسب‌زدایی، ج و د) ریزساختار پس از زینتر در دمای ۱۶۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت (ه) تصویر ایجادشده از الکترون بازگشتی^۱ از حضور فاز مذاب در کنار ذرات زیرکونیا

^۱ Backscattered electron

۳-۵- خواص اندازه‌گیری شده

خواص بوت‌ه زیرکونیایی ساخته‌شده در این پژوهش نظیر چگالی خام (قطعه تزریق‌شده)، چگالی قطعه زینترشده، تخلخل ظاهری و انقباض خطی اندازه‌گیری شد (جدول ۳). باتوجه به جذب آب نزدیک به صفر قطعه زیرکونیایی وجود ۱۸/۵ درصد تخلخل ظاهری؛ درصد تخلخل باز در قطعه، نزدیک به صفر بوده و همه حجم تخلخل‌ها، به تخلخل بسته تعلق دارد. همچنین درصد انقباض خطی نمونه‌ها حدود ۱۹ درصد است که برای قطعات بزرگ جهت جلوگیری از ترک، باید نمودار حرارتی زینتر با شیب کمتری دنبال شود؛ به‌خصوص که در قطعات زیرکونیایی

در محدوده دمایی ۱۲۴۰-۱۰۰۰ درجه سلسیوس، تغییر حجم ناگهانی ۴/۵ درصد مشاهده شد که سرعت افزایش دما در این محدوده باید حداکثر ۹۰ درجه سلسیوس بر ساعت باشد (Jiang et al., 2016; Yoon et al., 2014). از نظر چگالی حجمی^۱ و تخلخل ظاهری، بوت‌ه ساخته‌شده به‌روش قالب‌گیری تزریقی با فشار پایین مشابهت خوبی با بوت‌ه ساخته‌شده به‌روش پرس ایزواستاتیک سرد ساخته‌شده توسط شرکت Zircoa با شناسه ۳۰۰۱ [شرکت زیرکوا] دارد. تصاویر بوت‌ه زیرکونیایی در حالت تزریق‌شده، چسب‌زدایی‌شده و زینترشده در شرایط بهینه در شکل (۱۲) قابل مشاهده است.

جدول ۳. خواص بوت‌ه زیرکونیایی ساخته‌شده در این پژوهش

خواص موردنظر	چگالی حجمی قطعه تزریق‌شده (g/cm ³)	چگالی حجمی قطعه زینترشده (g/cm ³)	جذب آب (درصد)	تخلخل ظاهری	انقباض خطی (درصد)
بوت‌ه زیرکونیایی ساخته‌شده در این پژوهش	۳/۴۵ ± ۰/۲	۴/۵۰ ± ۰/۱	نزدیک به صفر	۱۸/۵ ± ۰/۵	۱۸/۸ ± ۰/۵
بوت‌ه زیرکونیایی با شناسه ۳۰۰۱ شرکت Zircoa	-	۴/۵۰	-	٪۱۸	-



شکل ۱۲. بوت‌ه (الف) تزریق‌شده، (ب) چسب‌زدایی‌شده و (ج) زینترشده

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مؤلفه‌های مؤثر بر روش قالب‌گیری تزریقی در فشار پایین برای شکل‌دهی بوت‌ه زیرکونیایی با ابعاد

۷۵×۸۵×۱۳۰ میلی‌متر (ارتفاع× قطر خارجی× قطر داخلی) و با حجم ۱۹۸/۳۴ سانتی‌مترمکعب (تقریباً دوبرابر بیشترین حجم قابل تزریق) موردبررسی قرار گرفت. مشاهده شد، این مؤلفه‌ها

¹ Bulk Density

11. Nogueira, R., et al., "Low-Pressure Injection Molding of Alumina Ceramics Using a Carnauba Wax Binder: Preliminary Results", *Journal of Key Engineering Materials*, Vol 189-191, (2001), 67-72. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.67>
12. Bauer, W., & Knitter. R. (2002). Development of a Rapid Prototyping Process Chain for the Production of Ceramic Microcomponents. *Journal of Materials Science*, 37, 3127-3140. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1016150126206>
13. Knitter, R., Bauer, W., Göhring, D., & Haußelt, J. (2001). Manufacturing of ceramic microcomponents by a rapid prototyping process chain. *Advanced Engineering Materials*, 3(1-2), 49-54. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200101\)3:1/2<49::AID-ADEM49>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200101)3:1/2<49::AID-ADEM49>3.0.CO;2-H)
14. Krindges, I., Andreola, R., Perottoni, C. A., & Zorzi, J. E. (2008). Low-pressure injection molding of ceramic springs. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5(3), 243-248. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02226.x>
15. Gadow, R., Kern, F. (2014), *Comprehensive Hard Materials* (pp.207-230), Chapter: Advanced Manufacturing of Hard Ceramics, Elsevier, Sarin, V.k. [10.1016/B978-0-08-096527-7.00025-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096527-7.00025-8). Zircoa. zirconia crucible. Available from: <http://zircoa.com/product.coarse.grain/crucible.zirconia.html>
16. Çetinel, F.A., Bauer, W., Knitter, R., & Haußelt, J. (2011). Factors affecting strength and shape retention of zirconia micro bending bars during thermal debinding. *Ceramics International*, 37(7), 2809-2820. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.04.076>
17. Çetinel, F.A., & Bauer, W. (2013). Ceramic micro parts. Part 2: Process-related factors influencing surface finish & shape retention during thermal debinding. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol 33(15-16), 3135-3144. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.06.019>
18. Gorjan, L., Kosmač, T., & Dakskobler, A. (2014). Single-step wick-debinding and sintering for powder injection molding. *Ceramics International*, 40(1), Part A, 887-891. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.06.083>
19. Zorzi, J.E., C.A. Perottoni., & Da Jornada. J.A.H. (2003). A new partially isostatic method for fast debinding of low-pressure injection molded ceramic parts. *Materials Letters*, 54(24-25), 3784-3788. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00179-4](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00179-4)
20. Gorjan, L., Dakskobler, A., & Kosmač, T. (2012). Strength evolution of injection-molded ceramic parts during wick-debinding. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(1), 188-193. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04872.x>
21. Rahaman, M.N. (2017). *Ceramic processing and sintering* (Vol. 1). CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781315274126>
22. Jiang, L., Guo, S., Bian, Y., Zhang, M., & Ding, W. (2016). Effect of sintering temperature on mechanical properties of magnesia partially stabilized zirconia refractory. *Ceramics International*, 42, 10593-10598. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.136>
23. Sardarian, M., Mirzaee, O., & Habibolahzadeh. A. (2017). Mold filling simulation of low pressure injection molding (LPIM) of alumina: Effect of temperature and pressure. *Ceramics International*, 43(1), 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.224>
24. Gonzalez-Gutierrez, J., Stringari, G.B., & Emri, I. (2012). Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts. *Some critical issues for injection molding*, 65-88. <https://doi.org/10.5772/38070>
25. Medvedovski, E., & Peltsman, M. (2012). Low pressure injection moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components. *Advances in Applied Ceramics*, 111(5-6), <http://dx.doi.org/10.1179/1743676112Y.0000000025>
26. Garrido, L.B., & Aglietti, E.F. (2004). Reaction-sintered mullite-zirconia composites by colloidal processing of alumina-zirconia-CeO₂ mixtures. *Materials Science & Engineering: A*, 369(1-2), 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.024>
27. Yoon, S., Van Tyne, C.J., & Lee, H. (2014). Effect of alumina addition on the microstructure & grain boundary resistance of magnesia partially-stabilized zirconia. *Current Applied Physics*, 14(7), 922-927. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2014.04.010>

بر خواص نهایی قطعات از جمله چگالی آن‌ها مؤثر هستند. همچنین مشخص شد که اثر فواره‌ای (Jetting effect) باعث ایجاد حفرات و تخلخل‌ها در قطعات تزریق‌شده، می‌شود و در نتیجه چگالی قطعات تزریق‌شده را کاهش می‌دهد. بهترین نتایج، در دمای تزریق ۹۰-۸۰ درجه سلسیوس، فشار تزریق ۳-۵ بار و زمان تزریق ۱۵-۱۰ ثانیه به دست آمد. در نهایت بوتنه سرامیکی زیرکونیایی ساخته‌شده در این پژوهش از لحاظ چگالی حجمی و تخلخل ظاهری با بوتنه زیرکونیایی ساخت شرکت Zircoa با شناسه ۳۰۰۱ مشابهت خوبی داشت.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت نوگرا سرام فلور به دلیل استفاده از امکانات آزمایشگاهی آن، کمال قدردانی را دارند.

مراجع

1. Ikuma, Y., Yoshimura, A., Ishida, K., & Komatsu, W. (1986). Phase transformation and toughening in MgO dispersed with ZrO₂. In *Tailoring Multiphase and Composite Ceramics*, Springer. 295-304. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-2233-7_22
2. Muccillo, E.N.S., Tadokoro, S.K., & Muccillo, R. (2004). Physical characteristics & sintering behavior of MgO-doped ZrO₂ nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 301-305. <https://doi.org/10.1023/B:NANO.0000034742.45278.2f>
3. Imran, A., Alam, S., Irfan, M., & Farooq, M. (2015). Micro Structural Study of Plasma-sprayed Zirconia-CaO Thermal Barrier Coatings. *Materials Today: Proceedings*, 2(10), 5318-5323. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.043>
4. Chen, C.C., Cheng, W.Y., Lu, S.Y., Lin, Y.F., Hsu, Y.J., Chang, K.S., Kang, C.H., & Tung, K. L. (2010). Growth of zirconia and yttria-stabilized zirconia nanorod arrays assisted by phase transition. *CrystEngComm*, Vol 12(11), 3664-3669. <http://dx.doi.org/10.1039/c000728e>
5. Duh, J. G., Dai, H. T., & Hsu, W. Y. (1988). Synthesis & sintering behaviour in CeO₂-ZrO₂ ceramics. *Journal of Materials Science*, 23(8), 2786-2791. <https://doi.org/10.1007/BF00547451>
6. Suk, M. O., & Park, J. H. (2009). Corrosion behaviors of zirconia refractory by CaO-SiO₂-MgO- CaF₂ slag. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(3), 717-723. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02905.x>
7. Koley, S., Ghosh, A., Sahu, A.K., Tewari, R., & Suri, A. K. (2011). Correlation of compaction pressure, green density, pore size distribution and sintering temperature of a nano-crystalline 2Y-TZP-Al₂O₃ composite. *Ceramics International*, 37(3), 731-739. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.11.003>
8. Farmer, S., C., Schoenlein, L. H., & Heuer, A. H. (1983). Precipitation of Mg₂Zr₃O₁₂ in MgO- Partially- Stabilized ZrO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 66(7), c107-c109. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb10600.x>
9. Rak, Z.S. (2000). Advanced shaping techniques in advanced ceramics. In CFI (Ceramic Forum International/Berichte der DKG) (Vol. 77). Available from: <http://zircoa.com/product.coarse.grain/crucible.zirconia.html>
10. Leverkoehne, M., Coronel-Hernandez, J., Janssen, R., Claussen, N., Dirscherl, R., & Gorlov, I. (2001). Novel Binder System Based on Paraffin- Wax for Low- Pressure Injection Molding of Metall-Ceramic Powder Mixtures. *Advanced Engineering Materials*, 3(12), 995-998. [http://dx.doi.org/10.1002/1527-2648\(200112\)3:12%3C995::AID-ADEM995%3E3.0.CO;2-D](http://dx.doi.org/10.1002/1527-2648(200112)3:12%3C995::AID-ADEM995%3E3.0.CO;2-D)