# مروری بر فرآیند ریخته‌گری ژلی در شکل‌دهی سرامیک‌ها

**محسن حاجی، مسعود علیزاده، تورج عبادزاده، هادی برزگر بفروئی، محمد حسن امین**

پژوهشگاه مواد و انرژی

*m.haji83@gmail.com*

***چکیده:*** *روش ریخته‌گری ژلی یک روش شکل‌دهی جدید برای سرامیک‌ها می‌باشد؛ که اخیراً توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این روش بر اساس ریخته‌گری یک دوغاب شامل پودر، آب و مونومرهای آلی محلول در آب، بنا شده است. بعد از افزودن یک پلیمر به عنوان آغازگر (کاتالیست) به محلول مونومری و بلافاصله ریختن آن درون قالب، دوغاب، پلیمریزه شده و یک قطعه ژله‌ای تشکیل می‌گردد. سپس این قطعه خشک شده، به منظور خروج پلیمرها حرارت می‌بیند و در نهایت زینتر می‌گردد. در این مقاله سعی شده مروری کلی پیرامون فرایند ریخته‌گری ژلی شامل آماده سازی دوغاب، فرایند ژله‌ای شدن، دفع حلال و پلیمر، مواد قالب، مزایا و معایب و در نهایت کاربردهای آن برای ساخت قطعات سرامیکی ارائه شود.*

***کلمات کلیدی:*** *ریخته گری ژلی، محلول مونومری، پلیمریزاسیون، دوغاب سرامیکی.*

## ۱- مقدمه

ریخته گری ژلی (Gelcasting) یک فرایند جدید و جذاب برای شکل‌دهی مواد سرامیکی با اشکال پیچیده و کیفیت بالا می‌باشد[۸-۱]؛ که اولین بار در آزمایشگاه ملی ORNL (Oak Ridg National Laboratory) آمریکا توسط Janney و Omatete معرفی شد[۹]. در این روش یک دوغاب از پودرهای سرامیکی و یک محلول مونومری آبی داخل یک قالب ریخته شده و به صورت درجا پلیمریزه می‌شود تا دوغاب به صورت ژل درآید، سپس قطعه ژلی شکل داده شده از قالب خارج شده و در نهایت خشک و زینتر می‌شود[۱۳-۱۰]. با استفاده از روش ریخته‌گری ژلی امکان شکل‌دهی تمام پودرهای سرامیکی وجود دارد زیرا تمام افزودنی‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلی بوده و پس از فرایند زینترینگ به طور کامل از قطعه خارج می‌شود.

با استفاده از این روش می‌توان قطعاتی کوچکتر از یک گرم و بزرگتر از ۶ کیلو گرم و اشکال پیچیده‌ای با سطح مقطع کمتر از ۰/۲ میلی‌متر را شکل داد. استفاده از این روش برای بیشتر سیستم‌های سرامیکی از قبیل آلومینا[۱۴،۱۲]، نیترید آلومینیوم، کاربید بور، فریت‌ها[۱۵]، کاربید سیلیکون[۱۶]، نیترید سیلیکون[۱۷]، اکسید روی، و زیرکونیا به علاوه بعضی از مواد دیگر از قبیل اکسید سریم، اکسید ایتریمم و هیدروکسی آپاتیت[۱۹،۱۸]، به کار گرفته شده است[۲۰].

مزایای روش ریخته‌گری ژلی در مقایسه با دیگر روش‌های مرسوم شکل‌دهی سرامیک‌ها از قبیل قالب‌گیری تزریقی و ریخته‌گری دوغابی شامل: استحکام و دانسیته خام بالا، قابلیت ماشین کاری قطعه خشک شده، امکان ساخت قطعات بزرگ با سطح مقطع نازک و ضخیم، زمان شکل‌دهی کوتاه و زمان کوتاه خروج باینـدر می‌باشد[۱۰].

این روش یک روش شکل‌دهی کلوئیدی بر مبنای استفاده از آب به عنوان حلال می‌باشد ولی می‌توان از سیستم‌های غیرآبی نیز برای پودرهایی که حساس به آب هستند استفاده کرد. تمام افزودنی‌ها و کمک فرایندهایی‌که برای ریخته‌گری‌دوغابی و پرس مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این روش نیز استفاده می‌شوند.

نکته حائز اهمیت در این روش، ساخت دوغابی با حداکثر میزان جامد و در عین حال دارای ویسکوزیته پایین می‌باشد[۷]. با استفاده از این روش، امکان تولید انواع قطعات سرامیکی از قبیل قطعات متراکم[۲۲،۲۱]، متخلخل[۲۴،۲۳]، اشکال پیچیده[۲۶،۲۵]، تغییرات ابعادی کم[۸] و کامپوزیت‌ها[۲۸،۲۷] وجود دارد.



[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]

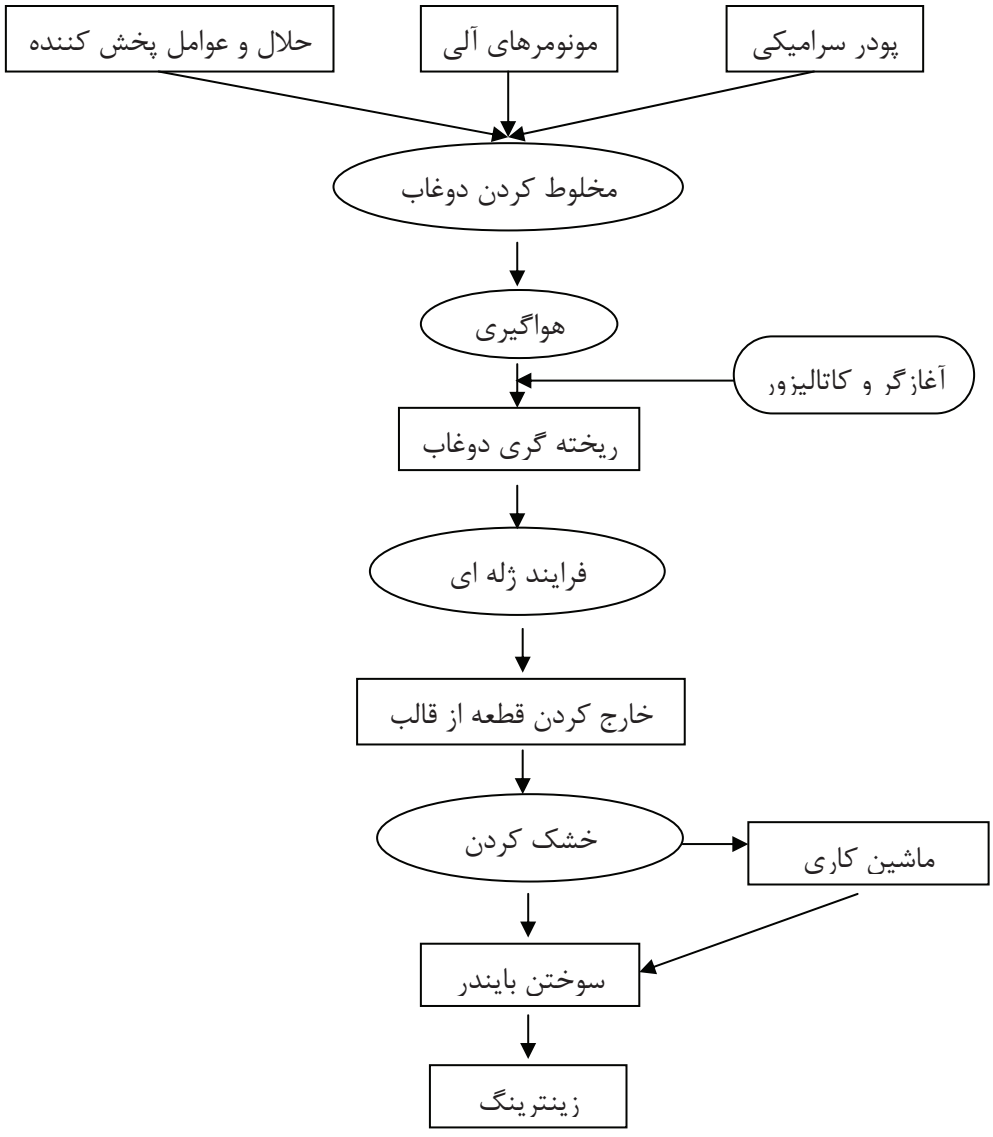
## ۲- فرایند ریخته گری ژلی

این روش، ترکیبی از فرایندهای ساخت سرامیک‌های سنتی و شیمی پلیمرها می‌باشد. اساسی‌ترین بخش این روش استفاده از یک محلول مونومری آلی برای ایجاد یک قطعه ژله‌ای با استحکام بالا می‌باشد[۲،۹،۲۹]. فلوچارت کلی این فرایند در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۱-آماده سازی دوغاب

برای آماده سازی دوغاب، محلول‌های مونومری آلی با ویسکوزیته پایین به همراه پودرهای سرامیکی و افزودنی‌های مناسب به شکل یک دوغاب با جریان یابی بالا ترکیب می‌شوند. سپس دوغاب آماده شده در قالب‌هایی با اشکال پیچیده ریخته می‌شود.

در این بخش، از آب به عنوان حلال، متااکریل آمید (MAM)، اکریل آمید (AM)، متیل بیس اکریل آمید (MBAM) (۳۵-۳۰) و پلی اتیلن گلیکل دی متا اکریلات (PEGDMA) به عنوان مونومر، پرسولفات آمونیوم (APS) به عنوان آغازگر (Initiator) و تترامتیل اتیلن دی آمید (TEMED) به عنوان کاتالیزور استفاده می‌شود[۲۸،۷،۳۶].




**شکل ۱**- شمای کلی فرایند ریخته‌گری ژلی [۲۰].



[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]

## ۲-۲-تشکیل ژل

فرایند ژله‌ای شدن بلافاصله پس از افزودن آغازگر و کاتالیزور به دوغاب و ریختن آن به درون قالب آغاز می‌شود؛ که شامل پلیمریزاسیون مونومرها به صورت ژل مرطوب و ترکیبات سفت و دارای اتصال عرضی (Cross-link) می‌باشد. فرایند پلیمریزاسیون توسط افزودن کاتالیست به دوغاب و یا گرم کردن قالب تسریع می‌شود[۴۰]. از آنجائیکه دماهایی که قالب بایستی گرم شود دمای پایینی می‌باشد (۸۵°C-۳۵)، لذا تکنیک‌های مختلف حرارت دهی از قبیل کوره‌های جریان ساکن، حمام‌های آب و حرارت دهی مادون قرمز مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ویژگی‌های قطعات تولید شده به واسطه ژل، دانسیته بالای قطعه نهایی می‌باشد[۲۱].

## ۲-۳-خروج حلال

بعد از فرایند ژله‌ای شدن، حلال باید از قطعه خارج شود، که این کار را می‌توان با خشک کردن انجام داد. برای پودرهای متراکم با اندازه بزرگ و دارای تخلخل‌های بزرگ، خشک کردن با هوا در شرایط معمولی و بدون نیاز به کنترل دقیق، کافی می‌باشد. ولی برای پودرهایی با اندازه ذرات کمتر از یک میکرومتر به دلیل تخلخل‌های خیلی ریز و امکان ترک خوردن قطعه در اثر انبساط حرارتی حلال و افزایش فشار بخار، باید کنترل بیشتری اعمال شود، که معمولا از شرایط با رطوبت بالای ۹۰ – ۸۰ درصد استفاده می‌شود. به علت اینکه قطعات ساخته شده با این روش نسبت به فرایند ریخته‌گری دوغابی دارای استحکام بالاتری می‌باشند، لذا سرعت خشک کردن قطعه در این روش سریع‌تر است[۸،۱۰].

## ۲-٤-دفع پلیمر

مقدار کمی از پلیمر در حین فرایند خشک شدن ژل، از قطعه خارج می‌شود. برای خارج کردن پلیمر باقیمانده در قطعه خشک شده، از روش پیرولیز اکسیژنی استفاده می‌شود. برای دفع کامل سیستم‌های دارای مونومر AM دمای ۶۰۰°C [۱۵] و یا بالاتر و برای سیستم‌های دارای مونومرهای MBAM-MAM [۳۹] و HAMA [۴۰] دمای حدود ۴۰۰°C نیاز می‌باشد؛ که علت اختلاف دمای ذکر شده قدرت پیوندهای پلیمرها است و از آنجائیکه قطعه به دلیل دفع حلال در مرحله خشک کردن دارای تخلخل‌های باز می‌باشد، پیرولیز با سرعت انجام می‌شود. برای قطعات با سطح مقطع ضخیم‌تر، جهت اطمینان از خارج شدن کامل پلیمرها، زمان فرایند پیرولیز را افزایش می‌دهند. اگر از خلاء و اتمسفر نیتروژن [۲۳] در درجه حرارت بالای ۶۰۰°C استفاده شود، تقریباً بین ۰/۵ تا یک درصد وزنی کربن در قطعه باقی می‌ماند[۳۸]. در نهایت با توجه به کاربرد، قطعه تا دمای مورد نیاز زینتر می‌شود.

## ۳- مواد قالب

انتخاب، ساخت و کاربرد قالب، از ویژگی‌های قابل توجه در فرایند ریخته‌گری ژلی هستند که موفقیت این فرایند را تضمین می‌کنند. اختلاف بین تولید محصولات سالم و معیوب، به دلیل انتخاب نوع مواد قالب، روش ساخت، روش پر شدن قالب و آزاد شدن قطعه از قالب می‌باشد[۸].

یک قالب خوب برای فرایند ریخته‌گری ژلی باید دارای ویژگی‌هایی نظیر: سطوح غیر قابل نفوذ، آزادسازی خوب قطعه و درز بندی خوب باشد. از آنجائیکه قالب‌ها برای شروع فرایند ژله‌ای شدن حرارت داده می‌شوند، موادی که به عنوان قالب استفاده می‌شود باید دارای رسانایی حرارتی بالایی باشند تا زمان گرم و سرد کردن قالب و قطعه کاهش یابد.

مواد مختلفی برای ساخت قالب‌های فرایند ریخته‌گری ژلی به کار گرفته شده‌اند، که در بین آن‌ها آلومینیوم، شیشه، پلی وینیل کلراید (PVC)، پلی استیرن (PS) و پلی اتیلن (PE) بیشترین کاربرد را دارند[۲۰].



[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]

## ٤- مزایای استفاده از روش ریخته‌گری ژلی

علاوه بر موارد ذکر شده در مقدمه، اخیراً مزایای دیگری نیز برای این روش گزارش شده است که تعـدادی از آنها به شرح زیر می‌باشد.

- توانایی تولید اشکال پیچیده مانند روش قالب‌گیری تزریقی[۲۵].
- سهولت انجام فرایند به علت تشابه با روش ریخته گری دوغابی[۲۸].
- ارزان بودن تجهیزات[۲۰].
- امکان استفاده از مواد قالب ارزان[۴۴].
- امکان تولید قطعات حجیم[۴۱].
- استحکام خام بالا[۱۱].
- قابلیت ماشین کاری خام عالی بدنه خام[۴۲].
- ساخت قطعات با خواص یکنواختی بالا[۲۴].
- استفاده از مقادیر کم مواد آلی که به آسانی از قطعه خارج می شوند[۳۲].
- قابلیت استفاده برای پودرهای فلزی و سرامیکی[۴۵].
- سریع بودن فرایند ژله ای شدن[۱۴].
- قابلیت تولید قطعات با تغیرات ابعادی کم[۲۴].

## ٥- محدودیت‌های ریخته‌گری ژلی

علی‌رغم اینکه فرایند ریخته‌گری ژلی توانایی شکل دادن قطعات با اشکال گوناگون و پیچیده را دارد ولی این روش دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد[۲۰]. به علت ویسکوزیته پایین دوغـاب‌هـای مـورد اسـتفاده، بـرای ساخت اشکال پیچیده، درز بندی قالب‌ها مشکل می‌باشد. بیشتر موادی که برای قالب استفاده می‌شوند، سطح آن‌ها اکسید می‌شود و می‌تواند باعث جلوگیری از ژله‌ای شدن و تـشکیل لایـه‌هـای واکنـشی شـود. میـزان اتصال‌دهنده‌های عرضی زیاد، باعث افزایش این حساسیت شده و در نتیجه تولید ژل‌های با اسـتحکام بـالا را محدود می‌کند[۱۰]. بیشتر قالب‌ها قطعه را به خوبی آزاد می‌کنند اما به دلیل زاویه ترشوندگی بالا با دوغـاب، ریختن دوغاب درون قالب بدون حباب هوا خیلی مشکل می‌باشد. پودرهایی با اندازه دانه خیلی ریـز و سـطح ویژه بالا هر چند که دانسیته فشردگی یکنواختی را ایجاد می‌کنند اما باعث ایجاد دوغابی با ویسکوزیته بالا و میزان جامد کم می‌شوند.

نکته دیگر اینکه، با پیرولیز در شرایط خنثی نمی‌توان به طور کامل پلیمرها را از قطعه خارج کـرد و در پایـان مقداری کربن در نهایت در قطعه باقی می‌ماند[۲۴،۲۸].

## ٦- کاربردها

همانطور که قبلاً ذکر شد، فرایند ریخته‌گری ژلی برای ساخت انواع قطعات سرامیکی با کاربردهـای مختلـف مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از کاربردهای مهم فرایند ریخته‌گری ژلی ساخت قطعاتی با اشکال پیچیده و بزرگ، از قبیل پره‌های توربین می‌باشد، که باید دارای ویژگی‌های کاملاً یکنواختی باشـند[۴۳]. بـا توجـه بـه اینکه قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری ژلی دارای استحکام خـام بـسیار بـالایی مـی‌باشـند، از ایـن رو قابلیت ماشین کاری این قطعات زیاد است[۴۴]. از این ویژگی می‌تـوان بـرای سـاخت قطعـات سفارشـی بـا اشکال پیچیده‌ای که توسط قالب نمی‌توان آن‌ها را شکل داد، استفاده کرد. در شکل (۲) نمونـه‌ای از قطعـات شکل‌دهی شده با این روش نشان داده شده است.

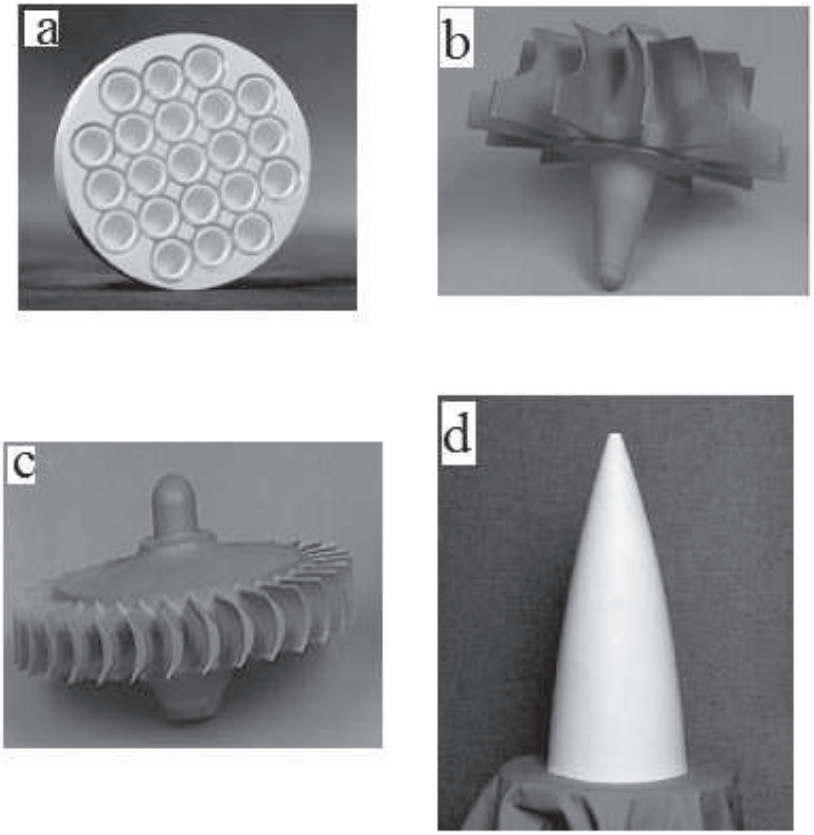


[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]

تا کنون از این روش برای ساخت قطعات زیر نیز استفاده کرده‌اند:

- سرامیک‌های متخلخل مانند غشاها[۴۶] و سنسورها[۴۷].
- سرامیک‌های پیزوالکتریک[۴۸،۴۹].
- سرامیک‌های مغناطیسی[۱۵].
- کامپوزیت‌ها [۵۰].
- بیو مواد[۵۱].
- قطعات با تغییرات ابعادی کم[۸].
- قطعات پیل‌های سوختی[۴۲].
- شکل‌دهی پودرهای فلزی از قبیل: ابزارهای فولادی[۵۲]، سوپر آلیاژهای بر پایه نیکل[۵۳] و غیره.




**شکل ۲**- نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده به روش ریخته‌گری ژلی، a) روتورتوربین از جنس نیترید سیلیکون به قطر ۱۵ cm، b) بوته‌های خام آلومینایی ماشین کاری شده (قطر هر کدام ۶ cm)، c) روتورتوربین از جنس نیترید سیلیکون به قطر ۱۸ cm، d) مخروط آلومینایی به طول ۶۰cm و قطر قاعده ۲۰cm [۲۰].

## مراجع


1. F. S. Ortega, R. H. R. Castro, D. Gouvêa, V. C. Pandolfelli, "The rheological behavior and surface charging of gelcasting alumina suspensions", Ceramics International, Volume 34, Issue 1, (2006).
2. A. C. Young, O. O. Omatete, M. A. Janney, P. A. Menchhofer, "Gelcasting of Alumina", Journal of the American Ceramic Society, Volume 74, Issue 3, Pages 612-618, (1991).
3. S. Roy, B. S. S. Chandra Rao, J. Subrahmanyam, "Water-based gelcasting of lead zirconate titanate and evaluation of mechanical properties of the gelcast samples", Scripta Materialia, Volume 57, Issue 9, Pages 817-820, (2007).
4. L. S. Gyger, P. Kulkarni, H. A. Bruck, S. K. Gupta, O. C. Wilson Jr , "Replamineform Inspired Bone Structures (RIBS) using multi-piece molds and advanced ceramic gelcasting




[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]

technology", Materials Science and Engineering: C, Volume 27, Issue 4, Pages 646-653, (2007).
5. W. Chen, Y. Kinemuchi, T. Tamura, K. Miwa, K. Watari, "Preparation of a–b plane oriented Nb-doped Bi4Ti3O12 ceramics by magnetic alignment via gelcasting", Materials Research Bulletin, Volume 41, Issue 11, Pages 2094-2101, (2006).
6. O. O. Omatete, M. A. Janney, S. D. Num,"Gelcasting: From laboratory development toward industrial production", Journal of the European Ceramic Society, Volume 17, Pages 407-413, (1997).
7. L. G. Ma, Y. Huang, J. L. Yang, H. R. Le, Y. Sun, "Control of the inner stresses in ceramic green bodies formed by gelcasting", Ceramics International, Volume 32, Issue 2, Pages 93-98 (2006).
8. R. Gilissen, J. P. Erauw, A. Smolders, E. Vanswijgenhoven, J. Luyten, "Gelcasting, a near net shape techniquent", Material and Design, Volume 21, Pages 251-257, (2000).
9. M. A. Janney, O. O. Omatete, C. A. Walls, S. D. Nunn, R. A. Ogle, G. Westmoreland, "Developme of Low-Toxicity Gelcasting Systems", Journal of the American Ceramic Society, Volume 81, Issue3, Pages 581-591, (1998).
10. J. P. Pollinger, "Gelcasting", Encyclopedia of Materials : Science and Technology, ISBN: 0-08-0431526, Pages 3486-3492, (2001).
11. F. Z. Zhang, T. Kato, M. Fuji, M. Takahashi, "Gelcasting fabrication of porous ceramics using a continuous process", Journal of the European Ceramic Society, Volume 26, Pages 667-671, (2006).
12. C. G. Ha, Y. G. Jung, J. W. Kim, C. Y. Jo, U. Paik, "Effect of particle size on gelcasting process and green properties in alumina", Materials Science and Engineerin, Volume 337, Pages 212-221, (2002).
13. A. A. Babaluo, M. Kokabi, M. Manteghian, R. Sarraf-Mamoory, "A modified model for alumina membranes formed by gel-casting followed by dip-coating", Journal of the European Ceramic Society, Volume 24, Pages 3779-3787, (2004).
14. J. Tong, D. Chen, "Preparation of alumina by aqueous gelcasting", Ceramics International, Volume 30, Pages 2061-2066, (2004).
15. W. Chen, Y. Kinemuchi, T. Tamura, K. Miwa, K. Watari, "Fabrication of textured ferroelectric ceramics by magnetic alignment via gelcasting", Journal of the European Ceramic Society, Volume 27, Issues 2-3, Pages 655-661,( 2007).
16. T. Zhang, Z. Zhang, J. Zhang, D. Jiang, Q. Lin, "Preparation of SiC ceramics by aqueous gelcasting and pressureless sintering", Materials Science and Engineering: A, Volume 443, Issues 1-2, Pages 257-261, (2007).
17. Z. P. Xie, Y. B. Cheng, Y. Huang, "Formation of silicon nitride bonded silicon carbide by aqueous gelcasting", Materials Science and Engineering: A, Volume 349, Issues 1-2, Pages 20-28, (2003).
18. A. Woesz, M. Rumpler, J. Stampfl, F. Varga, N. Fratzl-Zelman, P. Roschger, K. Klaushofer, P. Fratzl, "Towards bone replacement materials from calcium phosphates via rapid prototyping and ceramic gelcasting", Materials Science and Engineering: C, Volume 25, Issue 2, Pages 181-186, (2005).
19. S. Padilla, M. Vallet-Regí, M. P. Ginebra, F. J. Gil, "Processing and mechanical properties of hydroxyapatite pieces obtained by the gelcasting method", Journal of the European Ceramic Society, Volume 25, Issue 4, Pages 375-383, (2005).
20. M. A. Janney, S. D. Nunn, C. A. Walls, "Gel-casting", Handbook of Ceramic Engineering, (1998).
21. D. Guo, L. Li, Z. Gui, C. Nan, "Anti-crack machining of PZT ceramics for fabricating piezocomposites by using gelcasting technique", Materials Science and Engineering: B, Volume 99, Issues 1-3, Pages 25-28, (2003).
22. S. Gong, Z. Zheng, D. Zhou, Y. Hu, "Preparation of BaTiO3-based chip thermistors by gelcasting approach", Materials Science and Engineering: B, Volume 99, Issues 1-3, Pages 408-411, (2003).
23. K. Prabhakaran, S. Priya, N. M. Gokhale, S. C. Sharma, "Microporous alumina substrate withporosity >70% by gelcasting", Ceramics International, Pages 515-520, (2007).
24. H. T. Wang, X. Q. Liu, G. Y. Meng, "Porous α-Al2O3 ceramics prepared by gelcasting", Materials Research Bulletin, Volume 32, No. 12, Pages1705-1712, (1997).
25. K. Niihara, B. S. Kim, T. Nakayama, T. Kusunose, T. Nomoto, A. Hikasa, T. Sekino, "Fabrication of complex-shaped alumina/nickel nanocomposites by gelcasting process", Journal of the European Ceramic Society, Volume 24, Issue 12, Pages 3419-3425, (2004).
26. B. S. Kim, T. Sekino, Y. Yamamoto, T. Nakayama, T. Kusunose, M. Wada, K. Niihara, "Gelcasting process of Al2O3/Ni nanocomposites", Materials Letters, Volume 58, Issues 1-2, Pages 17-20, (2004).
27. J. Liu, H. Watanabe, M. Fuji, M. Takahashi, "Electrochemical Reduction of Oxygen on Alumina/Gelcast-Derived Nano-Carbon Network Composite in Alkaline Solution", Electrochemistry Communications, In Press, Accepted Manuscript, Available online 12 April (2008).

[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]

28. X. Liu, Y. Huang, J. Yang, "Effect of rheological properties of the suspension on the mechanical strength of Al2O3–ZrO2 composites prepared by gelcasting", Ceramics International, Volume 28, Pages 159–164, (2002).
29. M. A. Janney, O. O. Omatete, "Method for Molding Ceramic Powders Using a Water-Based Gelcasting", U. S. Pat. No. 5,028,362, (1991).
30. A. Chrambach, D. R. Odbard, "Fractionation and characterization of an oligomeric series of bovine keratohyalin by polyacrylamide gel electrophoresis", Material Science and Engineering, Volume 17, Pages 440-451, (1971).
31. R. R. Landham, P. Nahass, D. K. Leung, M. Ungureit, "Inorganic ultrafiltration membranes prepared by a combination of anodic film and sol-gel technologies", Journal of the American Ceramic Society, Volume 66, Pages 1513-1516, (1987).
32. R. L. Menchavez, M. Fuji, H. Takegami, M. Takahashi, "Electrically conductive gelcast porous alumina sintered under argon atmosphere", Materials Letters, Volume 61, Issue 3, Pages 754-756, (2007).
33. A. Barati, M. Kokabi, M. H. Navid Famili, "Drying of gelcast ceramic parts via the liquid desiccant method", Journal of the European Ceramic Society, Volume 23, Issue 13, Pages 2265-2272, (2003).
34. R. K. Kamboj, S. Dhara, P. Bhargava, "Machining behaviour of green gelcast ceramics", Journal of the European Ceramic Society, Volume 23, Issue 7, Pages 1005-1011, (2003).
35. Y. Hu, Z. Wang, J. Lu, "Study on the gel casting of fused silica glass", Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 354, Issues 12-13, Pages 1285-1289, (2008).
36. F. Li, H. J. Ni, J. Wang, B. Sun, Z. H. Du, "Gelcasting of aqueous mesocarbon microbead suspension", Carbon, Volume 42, Pages 2989-2995, (2004).
37. M. Kokabi, A. A. Babaluo, A. Barati, "Gelation process in low-toxic gelcasting systems", Journal of the European Ceramic Society, Volume 26, Pages 3083-3090, (2006).
38. Y. Li, Z. Guo, "Gelcasting of WC–8wt%Co tungsten cemented carbide", International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, (2007).
39. M. Potoczek, "A catalytic effect of alumina grains onto polymerization rate of methacrylamide-based gelcasting system", Ceramics International, Volume 32, Pages 739-744, (2006).
40. K. Cai, Y. Huang, J. Yang, "Alumina gelcasting by using HEMA system", Journal of the European Ceramic Society, Volume 25, Pages 1089-1093, (2005).
41. J. K. Montgomery, A. S. Botha, P. L. Drzal, K. R. Shull, K. T. Faber, "A thermoreversible gelcasting technique for ceramic laminates", Scripta Materialia, Volume 48, Pages 785-789, (2003).
42. D. Dong, J. Gao, X. Liu, G. Meng, "Fabrication of tubular NiO/YSZ anode-support of solid oxide fuel cell by gelcasting", Journal of Power Sources, Volume 165, Pages 217-223, (2007).
43. L. J. Vandeperre, A. M. Wilde, J. Luyten, "Gelatin gelcasting of ceramic components", Journal of Materials Processing Technology, Volume 135, Volume 312-316, (2003).
44. Z. X. Xiong, C. Fang, Y. X. Wang, Z. G. Su, "Gel-casting of ceramic components for wireless communications", Journal of the European Ceramic Society, Volume 25, Pages 2071-2074, (2005).
45. Y. Li, Z. Guo, J. Hao, S. Ren, "Gelcasting of metal powders in nontoxic cellulose ethers system", Journal of Materials Processing Technology, Available online 17 January (2008).
46. B. Lin, S. Zhang, L. Zhang, L. Bi, H. Ding, X. Liu, J. Gao, G. Meng, "Prontonic ceramic membrane fuel cells with layered GdBaCo2O5 cathode prepared by gel-casting and suspension spray", Journal of Power Sources, Volume 177, Issue 2, Pages 330-333, (2008).
47. Y. Hu, D. Zhou, D. Zhang, W. Lu, "PTCR characteristic of gelcast BaTiO3 ceramic thermistor", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 88, Issue 1, Pages 67-70, (2001).
48. D. Guo, K. Cai, L. Li, Z. Gui, "Application of gelcasting to the fabrication of piezoelectric ceramic parts", Journal of the European Ceramic Society, Volume 23, Issue 7, Pages 1131-1137, (2003).
49. D. Guo, K. Cai, L. Li, C. Nan, Z. Gui ,"Gelcasting of PZT", Ceramics International, Volume 29, Issue 4, Pages 403-406, (2003).
50. L. Shen, M. Liu, X. Liu, B. Li, "Thermal shock resistance of the porous Al2O3/ZrO2 ceramics prepared by gelcasting", Materials Research Bulletin, Volume 42, Issue 12, Pages 2048-2056,(2007).
51. S. Padilla, R. García-Carrodeguas, M. Vallet-Regí, "Hydroxyapatite suspensions as precursors of pieces obtained by gelcasting method", Journal of the European Ceramic Society, Volume 24, Issue 8, Pages 2223-2232, (2004).
52. A. Janney, S. Viswanathan, "Gelcasting of H13 tool steel", Metal Powder Report, Volume 52, Issue 5, Page 55,(1997).
53. M. A. Janney, "Gelcasting Superalloy Powders," Pages 139-46 in P/M in Aerospace, (1995).




[ Downloaded from jicers.ir on 2026-10-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.17353351.1388.5.3.2.3 ]