تفجوشی مواد با کمک امواج مایکروویو و مروری بر اختراع‌های ثبت شده

محمد احمدزاده [۱]، محمود علی‌اف خضرایی [۲]

۱ دانشجوی دکتری خوردگی و حفاظت از مواد

۲ نویسنده مسئول، استادیار خوردگی و حفاظت از مواد

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی،گروه خوردگی و حفاظت از مواد، بخش مهندسی مواد

khazraei@modares.ac.ir ،m.ahmadzadeh@modares.ac.ir

چکیده

استفاده از امواج مایکروویو در تفجوشی مواد فلزی و سرامیکی مزیت‌های بسیاری ازجمله سرعت بالاتر، خواص بهتر، صرفه‌جویی در انرژی و حفظ محیط‌زیست دارد. این روش که اندک‌اندک به‌صورت صنعتی نیز کاربرد یافته است می‌تواند در اندازه‌ها و جنس‌های مختلف به تفجوشی بدنه‌های فلزی و سرامیکی و حتی تولید مواد کامپوزیتی بپردازد. ثبت اختراع‌هایی که در این زمینه صورت گرفته است در مواردی مانند تفجوشی قطعات بزرگ، دستگاه‌های صنعتی تفجوشی با این روش، مواد کامپوزیتی، مواد فلزی با کاربردهای خاص و مواد سرامیکی با کاربردهای مختلف، نشان از اهمیت صنعتی این روش دارد و شناخت این اختراع‌ها می‌تواند به جنبه‌ها و کاربردهای مختلف این روش کمک شایانی کند. در این مقاله علاوه بر توضیح اجمالی اصول کلی تفجوشی با کمک امواج مایکروویو، به بررسی اختراع‌های ثبت شده در کشور امریکا نیز پرداخته خواهد شد.

واژگان کلیدی: تفجوشی، سینترینگ، مایکروویو، ، پتنت، اختراع،

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]

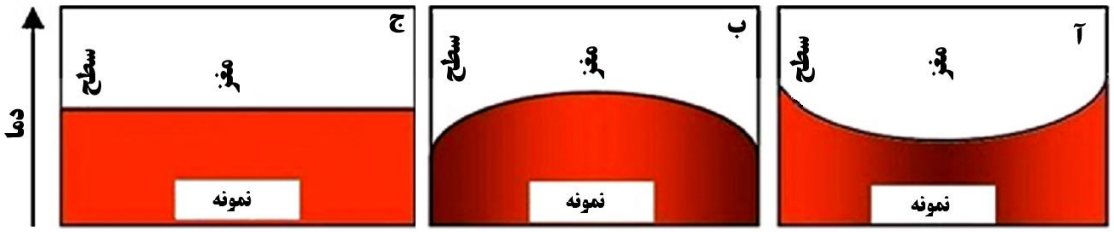
[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]

۱. مقدمه

استفاده از روش‌های جدید در تولید و فراوری مواد همواره موردتوجه بوده است. کاربرد امواج مایکروویو در تفجوشی کردن پودر فلزات و سرامیک‌ها در فرایند متالورژی پودر، فرایند جدیدی است که در جهان پذیرفته شده و به‌مرور درحال‌توسعه یافتن است[۱]. این فرایند با گرمادهی پودر شکل‌دهی شده تا ۰٫۶ یا ۰٫۸ نقطه ذوب صورت می‌گیرد. در این روش انواع مختلفی از مواد ازجمله فلزات و سرامیک‌ها، به شکل‌های مختلف فشرده شده یا فشرده نشده مورد تفجوشی قرار می‌گیرند. مزیت‌های روش مایکروویو عبارت‌اند از سرعت بیشتر در فرایند گرمادهی و تفجوشی، ریزساختار بهتر، فرایندهای نفوذ بهتر، مصرف انرژی کمتر، کمتر بودن دمای تفجوشی، خواص فیزیکی و مکانیکی بهتر و خطرات زیست‌محیطی کمتر[۲].

۱-۱. حرارت دهی در مایکروویو

استفاده از مایکروویو در گرمادهی سبب می‌شود تا ایرادات گرمادهی سنتی رفع شود. گرمادهی سنتی از سه راه انتقال حرارت همرفت، هدایت و تابش استفاده می‌کند، در این روش ابتدا سطح قطعه گرم شده سپس حرارت به سمت داخل حرکت می‌کند. به این صورت گرادیان دمایی در قطعه از سطح به عمق خواهد بود. درحالی‌که در تفجوشی مایکروویو گرمادهی به تمام ماده و سپس به حجم خواهد رسید[۳].



پروفیل دمایی در تفجوشی با آ) روش‌های سنتی، ب) روش مایکروویو ج) روش مایکروویو دوگانه[۳]

مشکلات ایجاد شده در اثر جهت حرارت دهی (در نوع سنتی خواص ضعیف مغز قطعه و در نوع مایکروویو خواص ضعیف سطح قطعه) منجر به توسعه روش دوگانه شد. این روش با جفت شدن حرارت دهی مایکروویو و حرارت دهی ماده پذیرنده به‌صورت دربرگیرنده با قابلیت تولید حرارت انجام می‌گیرد. این ماده پذیرنده قابلیت گرمادهی بالای مایکروویو در دماهای پایین در پیرامون بدنه دارد و به تفجوشی موادی که در دمای پایین فعالیت مایکروویو ندارند کمک می‌کند و علاوه بر سرعت بخشیدن به تفجوشی این مواد می‌تواند کیفیت تفجوشی را بهبود ببخشد[۴].

۱. مزایای تفجوشی مایکروویو

نفوذ بهتر درنتیجه گرمایش سریع‌تر یکی از مزایای این روش است. مشاهدات در این مورد به دو دسته تقسیم می‌شوند. مورد اول گسترش منطقه واکنش و تفجوشی تسریع شده و رشد دانه‌ها است که این مورد به علت پیچیدگی در اندازه‌گیری منجر به نتیجه قطعی نمی‌شود اما محققانی مانند کلارک[۱] یا پترسون[۲] با اندازه‌گیری مستقیم نفوذ این مورد را نشان داده‌اند[۵].

[۱] Clark

[۲] Patterson

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]

کاهش مصرف انرژی در گرمادهی مایکروویو مزیت دیگر این روش است که آن را می‌توان به تولید حرارت توسط خود ماده و کاهش ماده مؤثر گرم شده نسبت داد. در مورد مواد هادی دیواره‌ها و هوا دیگر گرم نمی‌شوند و تمام حرارت به بدنه می‌رسد. کاهش زمان تفجوشی مزیت دیگر این روش است، در روش‌های تفجوشی گرادیان دمایی و زمان لازم برای رسیدن به زمان موردنظر است، گرمادهی مایکروویو با حذف هدایت گرما از خارج و ذات سریع‌تر آن به کاهش زمان تا ۱۰ برابر منجر می‌شود[۶].

نفوذ روبه‌جلو یون‌ها در مایکروویو تقویت‌شده و رشد دانه‌ها و چگال شدن را بهبود ببخشد و باعث افزایش چگالی و توزیع بهتر اندازه ذرات می‌شود. این روش همچنین به توزیع مناسب‌تر دانه‌های رشد یافته و یکنواختی آن‌ها کمک می‌کند. مرحله میان چگال شدن و رشد دانه‌ها بر ریزساختار تفجوشی تأثیرگذار است، در بین همه فاکتورها سرعت گرمایش بهترین اثر را بر چگالی نهایی در اندازه دانه ثابت دارد. روش مایکروویو می‌تواند به معایب روش‌های سریع پخت و تفجوشی سنتی غلبه کند[۳].

۲. موارد کاربرد

بدنه‌های فلزی و کامپوزیت‌های زمینه فلزی بسیاری مانند مولیبدن، کبالت، تنگستن و غیره با این روش به‌صورت بهتری از روش‌های سنتی تفجوشی شده‌اند. همچنین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی مانند316L, 4434L به همراه آلیاژهای تنگستن- نیکل از این دسته‌اند[۳]. کامپوزیت‌هایی مانند کبالت- کاربید تنگستن، همچنین کامپوزیت‌های شبه پایدار آلومینیم- تیتانیم و کامپوزیت منیزیم مس به‌صورت نانو کامپوزیتی با این روش‌ها مورد تفجوشی واقع شده‌اند[۷].

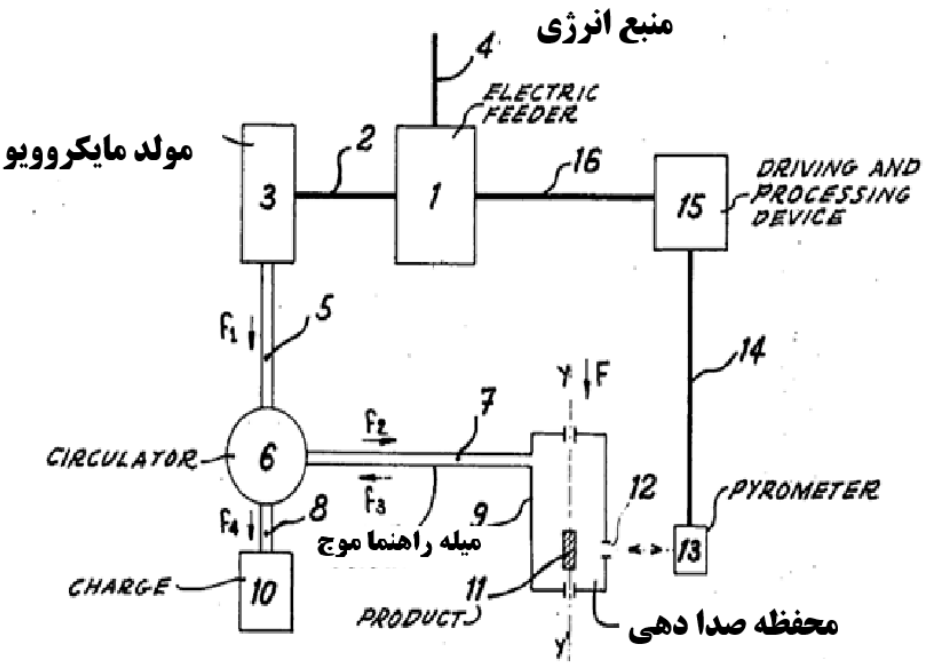
سرامیک‌های مختلفی مانند بدنه‌های پرسلانی با کاربردهای مختلف مانند کاربردهای دندانپزشکی[۸] همچنین الومینای شفاف، زیرکونیا، آلومینا- زیرکونیا، پودر $CaCu_3Ti_4O_{12}$ دارای ثابت دی‌الکتریک بالا، فریت های با تراوایی بالا و اکسید اورانیم از این دسته‌اند[۳].

۳. اختراع‌های تفجوشی با کمک مایکروویو

روش و دستگاه‌های فراوری برای تفجوشی محصولات سرامیکی محصول کار بسیاری از ثبت اختراع‌ها بوده است. برای مثال در مورد از این اختراع ها تأسیسات برای تفجوشی یا ذوب سرامیک در یک محفظه صدادهی با میله هادی موج که در آن تأسیسات در معرض مایکروویو قرار می‌گیرند، جای داده می شوند. این اختراع همچنین در مورد تغیر خطای اندازه‌گیری دما با مرجع و تغییر واکنش امواج مایکروویو در این تاسیسات بحث می کند، قسمت های مهم این چیدمان دستگاه، در شکل ۲ نشان داده شده است[۹].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]



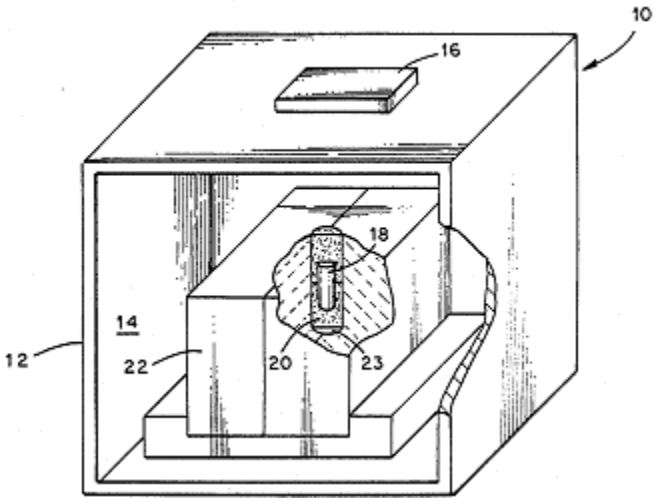
قرارگیری دستگاه‌ها در اختراعتفجوشی سرامیک‌ها با مایکروویو

در اختراع دیگری فرایند موردنظر برای تفجوشی پودر فلز فشرده شده، آلیاژ یا قطعه کامپوزیتی با اعمال امواج مایکروویو بررسی شده است. فلزات مدنظر این روش Fe, Ni, Co, Cu, Cr, Al, Mo, W, Sn هستند. حاصل این روش به نسبت روش‌های سنتی یکنواخت‌تر، پایدارتر چگال تر است. این فرایند به‌صورت تک‌مرحله‌ای، در فرکانس ۲,۴۵ گیگاهرتز، توان ۶ کیلووات، زمان بین ۵ تا ۶۰ دقیقه و دمای میان ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. اتمسفر آن مخلوط N_2, H_2 یا هیدروژن خالص بود. شکل و اندازه قطعات به‌صورت دقیق حفظ می شود. از SiC به عنوان ماده پیش گرم‌کننده برای کم کردن زمان فرایند استفاده شده است. در اختراع دیگری همین گروه به بست بیشتر این موارد و کاربرد در آلیاژهای آهن- نیکل – گرافیت پرداخته شده است[۱۰].

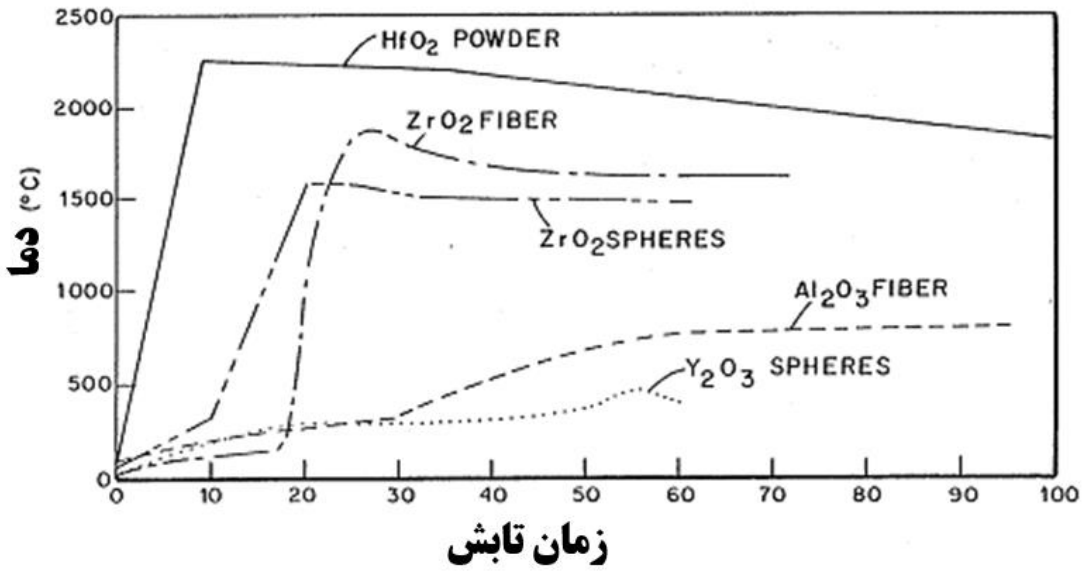
روش عملیات حرارتی و تفجوشی اکسید فلزات با تابش مایکروویو محصول کار دیگر ثبت اختراع‌ها بوده است. در این روش مواد اکسیدی معمولاً از دمای محیط تا دمای چند صد درجه بدون افزودنی تفجوشی می‌شوند. به این صورت که این اکسید در درون اکسیدی که خواص پذیرندگی مایکروویو در دمای محیط تا دمای پذیرندگی مایکروویو ماده اکسیدی تحت تفجوشی دارد کپسوله شده و تفجوشی انجام می‌شود. اکسید دربرگیرنده در دماهای زیر پذیرندگی اکسید مدنظر نقش عامل حرارتی از طریق هدایت حرارتی را دارد و در دماهای کوپلینگ و بالاتر اکسید تحت تفجوشی نقش عایق حرارتی را ایفا می‌کند. در شکل ۳ نمونه با شماره ۱۸و ماده در برگیرنده با شماره ۲۰ نشان داده شده اند و تغیر دما با زمان تابش به چند اکسید در شکل ۴ نشان داده شده است[۱۱].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]



ست آپ دستگاه برای اختراع در مورد روش تفجوشی و عملیات حرارتی(نمونه با شماره ۱۸ و ماده در برگیرنده با شماره ۲۰)[۱۱].



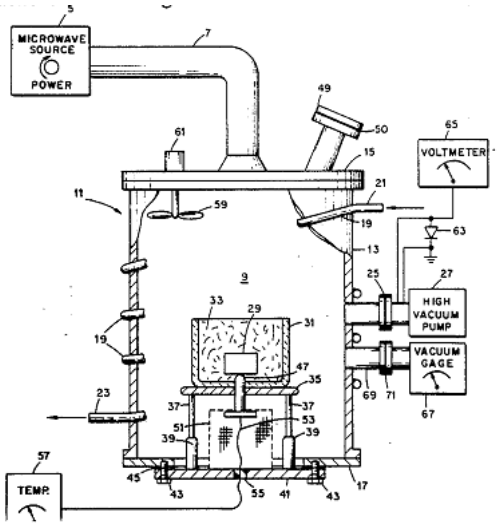
عملکرد دمایی سرامیک‌های مختلف در زمان تابش مایکروویو[۱۱].

مواد قابل‌جذب مایکروویو مانند کاربید بور، بورید سیلیسیم، نیترید سیلیسیم، اکسید اورانیم هستند که در این مورد استفاده می‌شوند. در دماهای بالا، مکانیزم های ریلکسیشن فرکانس‌های بالا رخ می‌دهد (مانند هدایت یونی و نوسان مولکولی) و ماده تحت تفجوشی نیز فعال می‌شود. مشکل در اینجا خلوص ماده تفجوشی شده تحت تأثیر ماده کمک‌کننده است. در شکل ۴ نشان داده شده است که هافنیا و زیرکونیا قابلیت فعالیت را در تمام دماها، از دمای محیط تا ۱۵۰۰ درجه را دارند. موادی مانند آلومینا و ایتریا این قابلیت را ندارند و باید به همراه ماده‌ای که این قابلیت را دارند مورد تفجوشی قرار بگیرند[۱۱]. در اختراع دیگری از مواد پذیرنده برای بستر تفجوشی قطعات فلزی و سرامیکی استفاده شده است[۱۲]. برای فراوری مایکروویو از پودر جاذب مایکروویو به‌صورت

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]

لایه‌ای در اطراف مواد و قطعاتی که مورد فراوری هستند می‌توان از پودر جاذب قوی مایکروویو استفاده کرد[۳]. این مواد مانند SiC, گرافیت و کربن سیاه، همه درصد بالایی از کربن را دارند[۱۳].

در مورد تفجوشی مایکروویو قطعات بزرگ سرامیکی اختراعی ثبت شده که در آن، در فرکانس حداقل ۲۸ گیگاهرتز منبع مایکروویو با توان قابل تنظیم به یک محفظه تنظیم نشده ساخته شده از جداره هادی الکتریسیته متصل می‌شود. قطعه سرامیکی باید درون یک ماده شفاف مایکروویو و عایق باید قرار گیرد، در شکل ۵ ماده با شماره۲۹ و محفظه با شماره ۳۱ مشخص است[۱۴].



قرارگیری دستگاه برای تفجوشی مایکروویو قطعات بزرگ سرامیکی(ماده با شماره۲۹ و محفظه با شماره ۳۱)[۱۴].

در اختراع دیگری به تفجوشی چندتایی قطعات سرامیکی آلومینایی و مخلوط آلومینا و کاربید سیلیسیم پرداخته می‌شود. در اینجا محفظه تفجوشی وجود دارد که خود درون محفظه مایکروویو قرار می‌گیرد[۱۵]، همچنین برای تفجوشی رادیو فرکانس نیز اختراع صورت گرفته است[۱۶]. به‌منظور جلوگیری بیشتر از هدر رفت حرارت در ثبت اختراعی به بررسی روش‌های عایق سازی حرارتی در تفجوشی مایکروویو پرداخته شده است[۱۷].

در مورد پودر سرامیکی نانو فاز و تفجوشی دماپایین و دمابالای آن ثبت اختراعی با شرح پرس گرم استفاده همزمان از فشار بالا (۱,۵ تا ۸ گیگا پاسکال) و دمای به نسبت پایین (۰,۲ تا ۰,۶ نقطه ذوب) ثبت شده است. تفجوشی در دماهای پایین، رشد دانه را متناسب‌تر می‌کند. یک مورد دیگر که به چگال شدن کمک می‌کند تغیر فاز در حین تفجوشی است[۱۸].

لحیم‌کاری واکنشی سرامیک‌ها با مایکروویو موضوع ثبت اختراعی در مورد روش اتصال مواد مشابه برای ساخت قطعات پیچیده است. موادی مانند اکسید آلومینیم اتصال داده شده و در دمای تبلور مجدد نگهداری می‌شوند[۱۹]. همچنین هدف‌های اسپاترینگ با تفجوشی مایکروویو تهیه شده‌اند. در این روش هدف‌های اسپاترینگ از پودر مواد آن‌ها تهیه می‌شود. فرایند شامل تهیه پودر، شکل‌دهی بدنه فشرده با دست‌کم چگالی ۴۰٪ و تفجوشی برای تهیه قطعه با چگالی حدود ۹۷٪ است، این تارگت ها عموماً مواد دی‌الکتریک یا سرامیکی هستند. مواد این گروه شامل اکسید منیزیم، نیوبیم، و تانتالم و دیگر مواد مانند نیترید بور و اکسید تیتانیوم و زیرکونیم است. [۲۰].

۴. نتیجه‌گیری

[۳] highly microwave absorbent powdered material (“HMAPM”)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]

با توجه به افزایش نیاز به تولید بیشتر و محدودیت در مصرف انرژی، روش‌های شکل‌دهی مواد با مصرف انرژی کمتر در مورد مواد با نقطه ذوب بالا، چه فلزات و چه سرامیک‌ها،مانند متالورژی پودر مورد توجه واقع شده‌اند. در این میان با توجه به نیاز به تفجوشی بدنه‌های تولید شده با این روش، روش سینترینگ با کمک مایکروویو به علت مزایایی مانند کیفیت بهتر و مصرف انرژی کمتر اهمیت یافته است. جدای از پیشرفت‌های علمی با توجه به کاربردهای صنعتی این روش بررسی مزایای تجاری این روش از طریق بررسی اختراع‌های انجام گرفته در این موضوع نشان از پیشرفت‌های بسیاری در کاربردهای تجاری این شاخه جدید تولید مواد دارد.

۵. مراجع

1. Breval, E., et al., *Comparison between microwave and conventional sintering of WC/Co composites.* Materials Science and Engineering: A, 2005. **391**(1): p. 285-295.
2. Leonelli, C., et al., *Microwave assisted sintering of green metal parts.* Journal of materials processing technology, 2008. **205**(1): p. 489-496.
3. Oghbaei, M. and O. Mirzaee, *Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications.* Journal of Alloys and Compounds, 2010. **494**(1): p. 175-189.
4. Menezes, R.R., P.M. Souto, and R.H.G.A. Kiminami, *Microwave hybrid fast sintering of porcelain bodies.* Journal of Materials Processing Technology, 2007. **190**(1–3): p. 223-229.
5. Katz, J.D., *Microwave Sintering of Ceramics.* Annual Review of Materials Science, 1992. **2** :(۱)۲ p. 153-170.
6. Clark, D.E. and W.H. Sutton, *Microwave Processing of Materials.* Annual Review of Materials Science, 1996. **26**(1): p. 299-331.
7. Wong, W. and M. Gupta, *Development of Mg/Cu nanocomposites using microwave assisted rapid sintering.* Composites Science and Technology, 2007. **67**(7): p. 1541-1552.
8. Medeiros, F.D.S.C., et al., *Microwave-assisted sintering of dental porcelains.* Ceramics International.(۰) ,
9. Bardet, G., *Plant and a process for sintering ceramic products*. 1979, Google Patents.
10. Roy, R., D.K. Agrawal, and J. Cheng, *Process for sintering powder metal components*. 2001, Google Patents.
11. Holcombe, C.E., N.L. Dykes, and T.T. Meek, *Method for heat treating and sintering metal oxides with microwave radiation*. 1989, Google Patents.
12. Apte, P.S. and L.R. Morris, *Microwave sintering process*. 1998, Google Patents.
13. Gedevanishvili, S., et al., *Microwave processing using highly microwave absorbing powdered material layers*. 2003, Google Patents.
14. Kimrey, H.D., *Method and device for microwave sintering large ceramic articles*. 1990, Google Patents.
15. Blake, R.D. and J.D. Katz, *Microwave sintering of multiple articles*. 1993, Google Patents.
16. Hoffman, D.J. and H.D. Kimrey, *Method and apparatus for radio frequency ceramic sintering*. 1993, Google Patents.
17. Holcombe, C.E., N.L. Dykes, and M.S. Morrow, *Thermal insulation for high temperature microwave sintering operations and method thereof*. 1995, Google Patents.
18. Kear, B.H., S.C. Liao, and W.E. Mayo, *High pressure and low temperature sintering of nanophase ceramic powders*. 2002, Google Patents.
19. Bruce, R.W., et al., *Microwave assisted reactive brazing of ceramic materials*. 2006, Google Patents.
20. Yang, F., et al., *High density ceramic and cermet sputtering targets by microwave sintering*. 2008, Google Patents.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1395.3.47.3.4]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-06]