دستگاه SPS و تاثیر پارامترهای آن بر ویژگی‌های نهایی قطعات

علی صداقت آهنگری حسین زاده*، مائده عسکرزاده، آرش فرجی

گروه مهندسی مواد، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

دکتر علی صداقت، نویسنده مسئول مقاله، عضو هیات علمی پژوهشگاه مواد و انرژی

* a.sedaghat@merc.ac.ir

چکیده: زینترینگ به کمک قوس پلاسما یا SPS یک فرآیند زینترینگ سریع است که قابلیت زینتر کردن انواع پودرهای رسانا و نارسانا را دارا می‌باشد. مکانیزم‌های متعددی برای فرآیند SPS پیشنهاد شده است اما متداولترین تئوری، تئوری میکرو اسپارک/پلاسما می‌باشد که بر اساس پدیده تخلیه الکتریکی و تولید لحظه‌ای جرقه پلاسما با دمای بسیار زیاد در کسر کوچکی از ثانیه در یک ناحیه موضعی کوچک بین ذرات پودر استوار می‌باشد. فرآیند SPS و مکانیزم آن تفاوت‌های زیادی با روش‌های معمولی زینترینگ دارد. برخی از مزایا و ویژگی‌های این فرآیند نسبت به روش‌های زینترینگ معمولی عبارتند از: قابلیت کاربرد برای مواد مختلف، تولید قطعات با دانسیته بالا، زمان زینترینگ بسیار کوتاه و تولید قعات با ساختارهای دانه ریز. در این مقاله، اصول فرآیند SPS، ویژگی‌ها، مزایا و عوامل موثر بر ویژگی‌های نهایی قطعات و برخی از کاربردهای آن معرفی شده است.

کلمات کلیدی: SPS، پارامتر موثر بر SPS، ویژگی قطعات SPS.

۱- مقدمه

تف جوشی یا زینترینگ فرآیندی است که طی آن یک قطعه از پودر ساخته می‌شود. این فرآیند با حرارت دادن مواد پودری در داخل کوره و در زیر نقطه ذوب انجام می‌شود که در اثر آن اتم‌ها حرکت (نفوذ) کرده و پیوند بین ذرات پودر برقرار می‌شود. فرآیند زینترینگ برای انواع پودرهای فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی کاربرد دارد. زینترینگ می‌تواند به روش‌های مختلفی مثل زینترینگ معمولی (داخل کوره)، زینترینگ با امواج ماکروویو، پرس داغ (HP)، پرس داغ ایزواستاتیک (HIP) و ... انجام شود. در میان روش‌های مختلف تف‌جوشی، روش SPS یک تکنولوژی جدید و سریع زینترینگ است که قابلیت اتصال ذرات را در مواد هادی و غیرهادی دارا می‌باشد. تئوری‌های مختلفی برای فرآیند SPS پیشنهاد شده است اما متداول‌ترین تئوری پذیرفته شده، تئوری میکرو اسپارک/پلاسما می‌باشد. این تئوری بر پدیده تخلیه الکتریکی و تولید جرقه استوار است که در آن پالس‌های جریان با آمپر بالا و ولتاژ پایین، بطور آنی (لحظه‌ای) جرقه پلاسما با دمای زیاد (بیش از ۱۰۰۰°C) را در یک ناحیه موضعی کوچک بین ذرات پودر ایجاد می‌کند[2,16]. در روش SPS از قطع و وصل پالس‌های جریان DC (برای تولید اسپارک و حرارت موضعی) و یک نیروی فشاری تک محوری استفاده می شود. به عبارت بهتر، در این روش برای انجام عملیات زینترینگ، بطور همزمان از فشار محوری و پالس‌های جریان DC (برای تولید حرارت) استفاده می‌شود. بنابراین SPS را می‌توان یک روش زینترینگ تحت فشار به حساب آورد[1-5].

فرایند SPS یک روش آسان و مقرون به صرفه ایست که استفاده از آن نیازمند هیچگونه تجربه خاص و یا مهارت در زمینه زینترینگ نمی‌باشد. امکان استفاده از مواد گوناگون، در برگرفتن دامنه وسیعی از مواد و سرعت بالای فرایند امکان ساخت مواد و قطعاتی از فلزها، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها تا FGM های بسیار پیشرفته و نیمه رساناهای ترموالکتریکی را فراهم می‌کند[16-17]. ویژگی افزایش سریع دما بوسیله خودگرمایی این امکان را می‌دهد که فرایند فشرده سازی و ساخت قطعه بدون از دست دادن ویژگی‌های اصلی ماده اتفاق بیفتاد، که در زینترینگ همرفتی به سختی امکان‌پذیر می‌باشد[16].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

سیستم SPS مزیت‌های بسیاری نسبت به سیستم‌های همرفتی مانند زینترینگ توسط پرس داغ یا پرس همگن داغ (HIP) یا کوره‌های خلاء دارد که از آن جمله می‌توان از راحتی در استفاده، کنترل دقیق میزان انرژی زینترینگ، قابلیت تولید مجدد مواد، سرعت بالای زینترینگ، ایمنی و قابلیت اطمینان را نام برد. همچنین مصرف انرژی در این روش نسبت به روش پرس داغ همرفتی ۳۰-۲۰% کاهش پیدا می‌کند[17].

SPS در زمینه ترکیب محدوده وسیعی از مواد سرامیکی، فلز – سرامیک و فلزی و همچنین در زینترینگ موادی چون آمورفها و مواد سازنده قطعات الکترونیکی که به آسانی در دماهای بالا تنزل خواص پیدا می‌کنند به نتاج مطلوبی دست یافته است. فلزات بسیار فعال مثل تیتانیوم و آلومینیم، FRC(fiber reinforced ceramics)های مختلف مانند زیرکونیا و آلومینا که شامل الیاف و whiskerها هستند سوپر هادی‌ها و FRM(fiber reinforced materials)های فلزی، مواد مغناطیسی، آلیاژ های سخت و دیگر مواد پیشرفته نیز فرایندهای موفقیت آمیزی را در SPS سپری کرده‌اند.

SPS با تجربه سنتز FGM(Functionally graded materials) ها، مواد شبه فلزی و اتصال ذوبی مواد غیر مشابه مانند فلز و شیشه به شهرت بسیار خوبی دست یافته است SPS . همچنین در زمینه پیمانه بندی بیسموت تلوراید (BiTe) برای ماژول پلتیر و تراشه‌های نیمه هادی ترموالکتریکی سیبک و همچنن سیلیکون- ژرمانیم(SiGe)، آهن - سیلیکون (FeSi) و منگنز – سیلیکون (MnSi) موفق بوده است.

SPS همچنین در زینترینگ و یکپارچه سازی سریع AlSi پودرهای آلومینیومی که به خاطر میکرو استراکچر نرمشان در سطح نانومتریک سخت زینتر می‌شوند نیز موفق بوده است.با SPS فشرده سازی اینگونه مواد و رسیدن به چگالی تقریبا ۱۰۰% از فاز پودری ودر عین حال حفظ استراکچر نانو متریک در چند دقیقه امکان پذیر است و موقعی که پس این فرم دهی اولیه به سرعت فورج شود خاصیت سوپر پلاستیسیته آن ۱۰۰ بار سریع‌تر از سرعت‌هایی است که قبلا به دست آمده و بنابراین این روش برای تولید حجم‌هایی با اجزای سه –بعدی مناسب می‌باشد.

SPS همچنین در کامپوزیت‌های ماتریسی فلزی Metal Matrix Composites (MMC) و مواد نانو کریستالی که زینترینگ آنها در روش‌های همرفتی سخت است، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنولوژی SPS به دلیل موثر بودن در بسیاری از نوآوری‌ها در زمینه توسعه مواد جدید و همچنین عاملیت در پیشرفت‌های عمده در زمینه عمل آوری مواد توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

در سال‌های گذشته نانوپودرها کاربرد صنعتی و تجاری زیادی نداشتند؛ زیرا روش‌های زینترینگ معمولی باعث تخریب ذرات و همچنین رشد آن‌ها می‌شد. اما از زمانی‌که تکنولوژی SPS برای زینترینگ مواد نانوکریستال با کمترین میزان رشد دانه و کمترین تأثیر منفی بر ذرات معرفی شد، افق تازه‌ای برای مطالعه و بررسی ایده‌های جدید در زمینه کاربرد مواد پودری گشوده شده است[2].

۲- مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱- تاریخچه

تحقیقات اولیه در زمینه تکنولوژی SPS در اواخر سال ۱۹۳۰ میلادی، یعنی زمانی‌که فرآیند زینترینگ با استفاده از انرژی الکتریکی در امریکا ابداع گردید، آغاز شد. در سال ۱۹۶۰ فرآیند مشابهی که بر پایه تولید پالس‌های جریان برای عملیات زینترینگ استوار بود، به نام تف‌جوشی جرقه‌ای، در ژاپن معرفی شد؛ اما به دلیل عدم کاربرد تکنولوژیکی در آن زمان، قیمت بالای تجهیزات، عدم توجیه اقتصادی، محدودیت صنایع نیازمند به این روش و ... چندان گسترش نیافت. تا اواخر سال ۱۹۷۰ تحقیقات کمی در زمینه این فرآیند انجام شد اما چند سال بعد یعنی از اواسط سال ۱۹۸۰ تا اوایل سال ۱۹۹۰ نسل دوم دستگاه‌های SPS توسعه یافتند. این دستگاه‌ها سیستم های آزمایشگاهی بسیار کوچک به نام تف‌جوشی فعال شده با پلاسما (PAS)[11] بودند که درآن‌ها از مولد پالس ۸۰۰ آمپر یا بیشتر و ماکزیمم فشار اعمالی در حدود ۵ تن برای انجام فرآیند زینترینگ استفاده می‌شد. با این وجود، نسل سوم این تکنولوژی پیشرفته، دستگاه‌های SPS با مولدهای پالس DC با آمپر بالا (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ آمپر)، فشار ۱۰۰-۱۰ تن و ولتاژ پایین (۳۰-۳ ولت) هستند که به دلیل داشتن مزایای زیاد به عنوان یک تکنولوژی جدید

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

در تولید سرامیک‌های پیشرفته، مواد کامپوزیتی، قطعات متالورژی پودر فلزی و .... شهرت یافته است. لازم به ذکر است که به این گروه از تکنولوژی‌های زینترینگ که در آن‌ها از پالس‌های جریان استفاده می‌شود، EPAC یا PECS یا FAST نیز گفته می‌شود. در سال‌های اخیر، این تکنولوژی به دلیل داشتن مزایای بسیار زیاد، توجه زیادی را در بین مهندسان و تولیدکنندگان به خود جلب کرده است[5-6].

۲-۲-مبانی تئوری شیمی فیزیک دستگاه[16,17]

SPS یک فرایند جدید برای ساخت و عمل آوری مواد است که زینتر کردن و ذوب‌های اتصالی را در دمای پایین و زمان کوتاه به وسیله پرکردن فواصل بین ذرات پودرها با انرژی الکتریکی و ایجاد پلاسمای جرقه‌ای با دمای بالا به طور لحظه‌ای امکان پذیر می‌سازد.

این روش به عنوان یک روش زینترینگ سریع، با استفاده از عملیات خود گرمایی از درون پودرها مشابه به ترکیب خود پخش شونده با دمای بالا (SHS) و زینترینگ مایکروویو عمل می‌کند. فرایند SPS بر پایه پدیده تخلیه جرقه الکتریکی انجام می‌پذیرد. انرژی بالا و ولتاژ پایین جریان پالسی جرقه‌ای به صورت لحظه‌ای یک دمای بالای متمرکز تا ده هزار درجه سانتیگراد بین ذرات ایجاد می‌کند که منجر به یک گرمایش بهینه و نفوذ الکترولیتی می‌گردد. محدوده دمای زینتزینگ SPS از کمترین تا بیشترین ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد است که ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد کمتر از زینترینگ همرفتی است.

تبخیر، ذوب و زینترینگ در یک پریود کوتاه ۵ تا ۱۰ دقیقه‌ای کامل می‌شود که شامل بالا رفتن دما و تحت فشار قرار گرفتن می‌باشد.

فرایند SPS که انرژی زیاد پالس‌ها را در نقطه اتصال دانه‌ها متمرکز می‌کند یک پیشرفت در زینترینگ نسبت به پرس داغ همرفتی و HIP محسوب می‌شود.

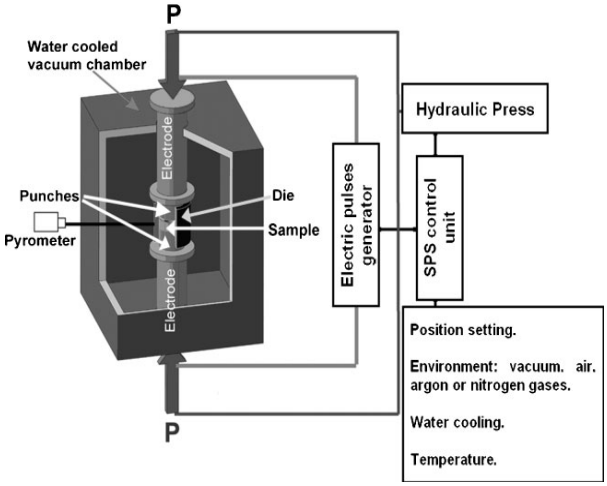
حال نگاهی داریم به مکانیزم شکل گیری نخی (neck formation) در فرایند SPS. همانطور که توضیح داده شد هنگامی‌که تخلیه جرقه‌ایی بین فواصل موجود میان ذرات مواد در فرایند SPS رخ می‌دهد در آن محل یک دمای بالا تا ده هزار درجه سانتیگراد به طور لحظه‌ای ایجاد می‌شود که باعث تبخیر و جوش خوردن سطح ذرات پودر در فرایند SPS می‌شود شکل‌های به هم فشرده یا neck ها به شکل اطراف ناحیه اتصال ذرات در می‌آیند این neck ها بتدریج پیشرفت می‌کنند و در طول زینترینگ به حالت پلاستیکی تغییر شکل پیدا می‌نمایند. در نتیجه ما یک قطعه زینترشده با چگالی بالای ۹۹% خواهیم داشت. از آنجایی‌که فقط دمای سطح ذرات بوسیله خودگرمایی به سرعت بالا می‌رود رشد دانه‌های پودر کنترل می‌شود. از اینرو در این روش به یک فشرده سازی و زینترینگ صحیح در زمان کوتاهتری دست یافته‌ایم. به طور همزمان در این روش امکان تولید یک حجم از ذرات با ساختار آمورفی و نانو کریستالی بدون تغییر در خواص خواهیم داشت.

۲-۳- اجزای اصلی دستگاه SPS [6,17]

شکل ۱ قسمت‌های اصلی یک سیستم SPS معمولی را نشان می‌دهد. این سیستم شامل قسمت‌های زیر می‌باشد: محفظه خلأ (شکل ۲)؛ دستگاه فشار تک محوری شامل پانچ‌های آبگرد که به عنوان الکترود نیز عمل می‌کنند (شکل ۲)؛ دستگاه کنترل اتمسفر (خلأ، هوا یا گاز خنثی مثل آرگون)؛ مولد پالس‌های جریان DC؛ واحد کنترل سیستم خنک‌کننده آبگرد؛ سیستم کنترل و تنظیم فشار اعمالی و دما؛ قفل ایمنی داخلی دستگاه؛ قالب گرافیتی (شکل ۳). در روش‌های زینترینگ معمولی، ابتدا می‌بایست پودر با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک و یک قالب مناسب، تحت فشار لازم قرار گرفته و قطعه خام تولید شود و سپس برای زینترینگ داخل کوره قرار گیرد. اما در روش SPS مقدار مشخص و اندازه‌گیری شده از پودر موردنظر که قبلاً آسیاب و خشک شده است مستقیماً به داخل قالب‌های گرافیتی تغذیه شده و سپس به وسیله پانچ‌ها قالب بسته می‌شود. برای اینکه قطعه زینتر شده در پایان فرآیند به راحتی از قالب جدا شود، سطح بین قالب و پانچ را به وسیله ورقه‌های گرافیتی پوشش می‌دهند. پس از قرارگیری قالب محتوی نمونه پودری داخل محفظه زینترینگ، درب محفظه بسته شده و اتمسفر مناسب (خلأ یا گاز خنثی مثل آرگون) درون آن ایجاد می‌گردد. در نهایت با دادن پارامترهای فرآیند یعنی دما، زمان، فشار قالب و فرکانس پالس‌های جریان (زمان قطع و وصل شدن پالس‌ها) به سیستم کنترل دستگاه، دکمه استارت زده شده و عملیات زینترینگ آغاز می‌شود.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]



شکل ۱- قسمت‌های اصلی ماشین SPS [9]

شکل ۲- محفظه خلأ و محور اعمال فشار [9]

شکل ۳- قالب گرافیتی[10]

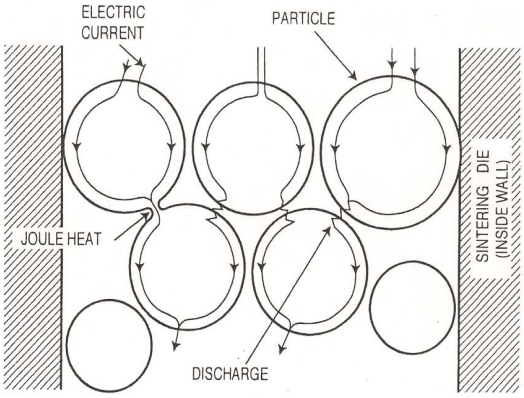
با شروع عملیات زینترینگ، پالس‌های جریان DC از الکترودها (پانچ‌ها)ی گرافیتی عبور کرده و بطور همزمان فشار محوری نیز اعمال می‌شود. اسپارک‌هایی که بین ذرات پودر ایجاد می‌شود دمای نمونه را به سرعت افزایش داده و منجر به انتقال جرم (نفوذ) آنی اتم‌ها می‌گردد. پس از اتمام فرآیند، دستگاه به صورت اتوماتیک خاموش شده و نمونه به تدریج سرد می‌شود.

لازم به ذکر است که فشار محوری در روش SPS می‌تواند تا ۵۰۰MPa در قالب‌های خاص افزایش یابد. اما در قالب‌های معمولی، ماکزیمم مقدار ممکن برای فشار اعمالی بسته به اندازه قالب و خواص مکانیکی آن در محدوده بین ۱۵۰-۲۰۰MPa می‌باشد. با این همه باز هم این فشار از فشار اعمالی در روش پرس داغ بیشتر است.

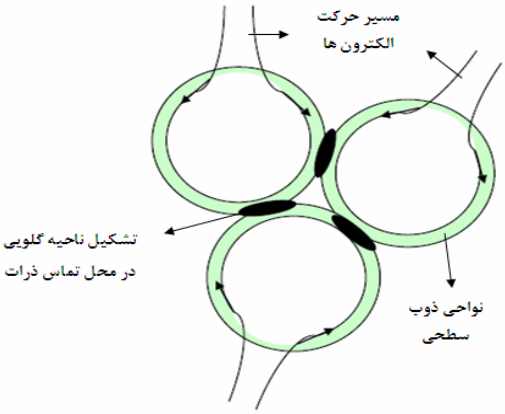
[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

۲-۴-مکانیزم فرآیند SPS

همانطور که گفته شد SPS یک روش رینترینگ تحت فشار است که بر اساس تخلیه الکتریکی پالس‌های جریان در فاصله بین ذرات پودر و تولید اسپارک (جرقه) عمل می‌کند. در شکل ۴ نحوه انتشار و عبور پالس‌های جریان از بین ذرات پودر نشان داده شده است[6]. زمانی‌که اسپارک ناشی از تخلیه الکتریکی در محل اتصال یا فاصله بین ذرات پودر ایجاد می‌شود، حرارت موضعی ایجاد شده در ستون تخلیه باعث افزایش آنی دما تا بیش از ۱۰۰۰°C می‌شود. این حرارت بالا باعث تبخیر ناخالصی‌ها و همچنین تبخیر سطحی ذرات پودر در محدوده اسپارک می‌شود. بلافاصله پس از این ناحیه تبخیر، یک ناحیه ذوب سطحی ایجاد می‌گردد. این نواحی ذوب سطحی از طریق جریان الکترون‌ها (در طی زمان وصل جریان) و ایجاد خلأ (در طی زمان قطع جریان) به سمت هم کشیده شده و ناحیه گلویی را تشکیل می‌دهند (شکل ۵). شکل ۶ مراحل تشکیل گلویی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ذرات ریز ناخالصی و گازهای موجود بین ذرات پودر، به شروع تخلیه الکتریکی و تولید اسپارک در فضای خالی بین ذرات کمک می‌کنند[5,17و2]. مطابق این شکل تشکیل ناحیه گلویی شامل ۵ مرحله است: ۱- مرحله ابتدایی: تولید اسپارک ناشی از تخلیه الکتریکی، به وسیله قطع و وصل پالس‌های جریان؛ ۲- تولید پلاسما (یونیزه شدن گازهای موجود در فضاهای خالی بین ذرات در اثر تخلیه الکتریکی)؛ ۳- تبخیر و ذوب سطحی ذرات پودر؛ ۴- تولید فشار ناشی از ضربه اسپارک و پراکنده شدن ذرات ذوب یا تبخیر شده: برخورد شدید الکترون‌های آزاد (که در اثر تخلیه الکتریکی ایجاد شده‌اند) و یون‌ها (که در اثر یونیزه شدن گاز تولید شده‌اند) با سطح ذرات، منجر به حذف ناخالصی‌های موجود در سطح ذرات و در نتیجه پاکسازی و فعال‌سازی سطحی ذرات پودر می‌شود. این مسئله باعث برقراری پیوند قوی‌تر بین ذرات شده و فرآیند چگالش نمونه را سرعت می‌بخشد؛ ۵- کشیده شدن نواحی ذوب سطحی به طرف یکدیگر و تشکیل ناحیه گلویی[۱۲و۵].

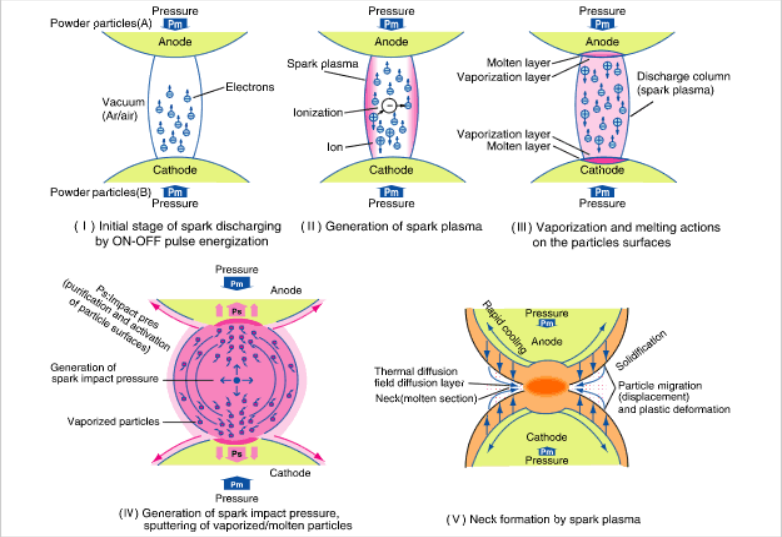


شکل ۴- تصویر شماتیک عبور پالس‌های جریان از میان ذرات پودر و تولید حرارت (تشکیل ناحیه گلویی)[5,7]



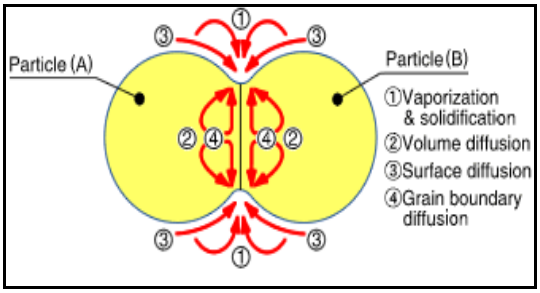
شکل ۵- حرارت موضعی ایجاد شده در محل تماس ذرات پودر بر اثر تخلیه الکتریکی (ذوب سطحی) و تشکیل ناحیه گلویی[11]

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]



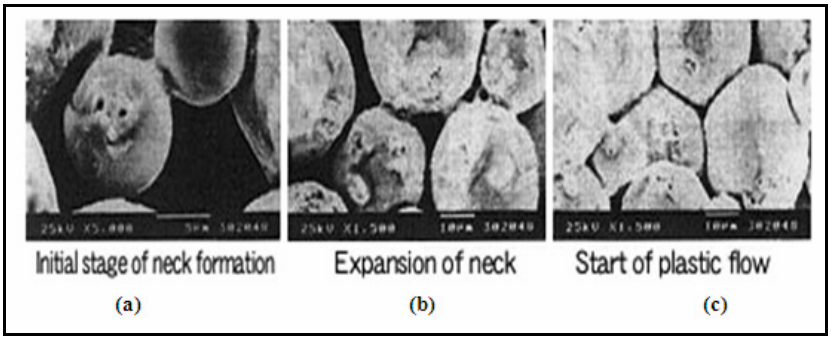
شکل ۶- مراحل تشکیل ناحیه گلویی[5]

افزایش مداوم تشعشعات حرارتی و فشار باعث می‌شود که این ناحیه گلویی به تدریج رشد کرده و گسترش یابد. تشعشعات حرارتی همچنین باعث تغییر فرم پلاستیک در سطح ذرات پودر می‌شود که این مسئله باعث رسیدن به دانسیته‌های بالا می‌شود[6,17]. شکل ۷ مکانیزم‌های متداول انتقال جرم شامل تبخیر، انجماد، نفوذ حجمی، نفوذ سطحی و نفوذ مرزدانه‌ای را در ناحیه گلویی نشان می‌دهد[6].



شکل ۷- مکانیزم‌های انتقال جرم در فرآیند تشکیل ناحیه گلویی[7]

تصاویر SEM نشان داده شده در شکل ۸ مراحل رشد گلویی در ذرات کروی پودر برنز در حین فرآیند SPS را نشان می‌دهد[6]. شکل ۸a مرحله ابتدایی شکل‌گیری گلویی را به دلیل ایجاد اسپارک و تولید حرارت موضعی، نشان می‌دهد. انرژی پالس‌های جریان باعث تولید اسپارک، یکی پس از دیگری (به دلیل تخلیه الکتریکی) بین ذرات پودر می‌شود. حتی در یک ذره از پودر، با تکرار فرآیند تخلیه الکتریکی، تعداد مناطق گلویی (بین ذره مورد نظر و ذرات مجاور) افزایش می‌یابد (شکل ۸b)[5].



شکل ۸- مراحل رشد گلویی در ذرات کروی پودر برنز: (a) مرحله ابتدایی تشکیل گلویی؛ (b) پیشرفت گلویی؛ (c) شروع جریان پلاستیک[5]

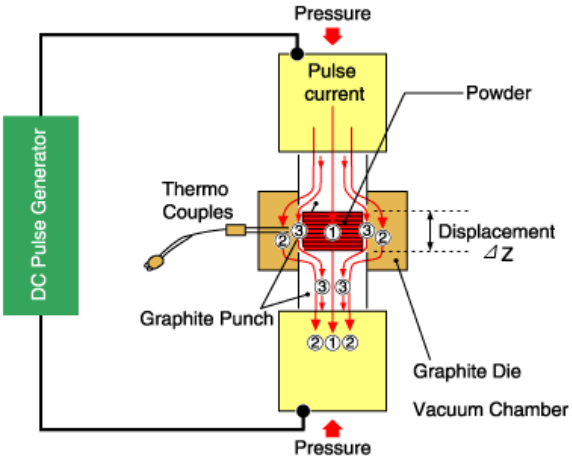
[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

از آنجایی‌که در فرآیند SPS حرارت فقط روی سطح ذرات متمرکز می‌شود، بنابراین رشد ذرات به شدت محدود می‌شود. بنابراین کل فرآیند (یعنی از زمانی که نمونه به صورت پودر است تا زمانی‌که نمونه به صورت یکپارچه در می‌آید) با سرعت بالا، یکنواختی عالی و بدون تغییر مشخصه‌های پودر انجام می‌شود[5].

علاوه بر این، نیرو (فشار) نیز نقش بسیار مهمی را در جلوگیری از رشد دانه‌ها و نیز در تعیین دانسیته ایفا می‌کند. در فرآیند SPS تعیین صحیح و دقیق نیرو عملاً می‌تواند به پیشرفت فرآیند کمک کند. بدین ترتیب که عامل فشار باعث بالارفتن تعداد اسپارک‌ها شده و بنابراین نفوذ را در سرتاسر نمونه افزایش می‌دهد (زیرا فشار باعث انتقال جرم به ویژه در مرحله خروج گاز می‌شود). اما افزایش یا کاهش بیش از حد فشار می‌تواند تأثیر منفی بر پیشرفت فرآیند داشته باشد. در نمونه‌های بزرگ، زمانی‌که دانسیته بالا مورد نیاز است، فشار معمولاً منجر به افزایش خروج گاز و نفوذ الکتریکی می‌شود[2]. بنابراین با ترکیب مقادیر بهینه نیروی تغییر فرم پلاستیک (فشار) و حرارت (دمای اندازه‌گیری شده روی دیواره بیرونی قالب) می‌توان یک قطعه زینتر شده با پیوندهای بین دانه‌ای مناسب تهیه کرد. چنانچه فشار و دمای فرآیند بیش از حد پایین باشد، پیوندهای بین دانه‌ای ایجاد شده متخلخل خواهند بود؛ از طرف دیگر دماها و فشارهای بالاتر نیز منجر به کاهش مرزدانه‌ها (به دلیل رشد دانه‌ها) می‌شود[2,5].

۲-۵-تأثیرات پالس‌های جریان DC

در شکل ۹ مسیر عبور پالس‌های جریان DC در ماشین SPS نشان داده شده است[2,17]. در فرآیندهای معمولی زینترینگ مثل پرس داغ الکتریکی که در آن از جریان‌های DC یا AC استفاده می‌شود، فاکتورهای اصلی برای پیشرفت عملیات تفجوشی، حرارت تولید شده توسط منبع نیرو (I^2R) و سیلان پلاستیک مواد به علت استفاده از فشار می‌باشد. اما در روش SPS علاوه بر دو فاکتور فوق، تخلیه الکتریکی بین ذرات پودر نیز به صورت چشمگیری بر پیشرفت عملیات تفجوشی تأثیرگذار است[5]. عملیات قطع و وصل شدن پالس‌های جریان DC چهار نتیجه مهم را به دنبال دارد: ۱- تولید جرقه پلاسما؛ ۲- فشار ناشی از ضربه اسپارک؛ ۳- تولید حرارت و ۴- ایجاد میدان الکتریکی.

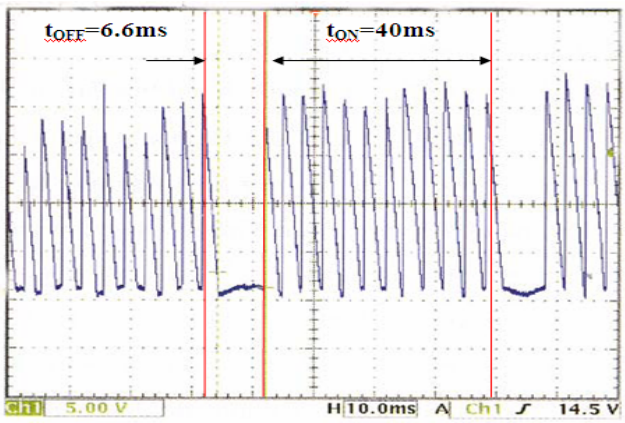


شکل ۹- تصویر شماتیک مسیر عبور پالس‌های جریان DC در ماشین SPS [2,5]

حرارت بالای تولید شده توسط جرقه پلاسما و فشار ناشی از ضربه اسپارک، گازهای جذب شده و ناخالصی‌های موجود روی سطح ذرات پودر را از بین می‌برد. میدان الکتریکی نیز باعث افزایش سرعت نفوذ و انتقال جرم به دلیل افزایش حرکت یون‌ها می‌شود.

تعداد پالس‌ها در واحد زمان و فاصله زمانی بین پالس‌ها بسته به نوع پودر می‌تواند تغییر کند. بر این اساس فاصله زمانی بین پالس‌ها در محدوده ۳۰۰ms-۱ متغیر است. اما زمان استاندار قطع و وصل شدن پالس‌های جریان که معمولاً توسط سازنده دستگاه توصیه می‌شود، ترتیب زمانی ۱۲:۲ می‌باشد (شکل ۱۰). یعنی در هر ۴۰ms دوازده پالس از پودر و قالب عبور کرده و سپس به اندازه دو پالس (یعنی مدت زمان ۶/۶ms)، جریان قطع می‌شود. به عبارت دیگر در حالت استاندارد فاصله زمانی بین هر پالس ۳/۳ms در نظر گرفته می‌شود[6,7].

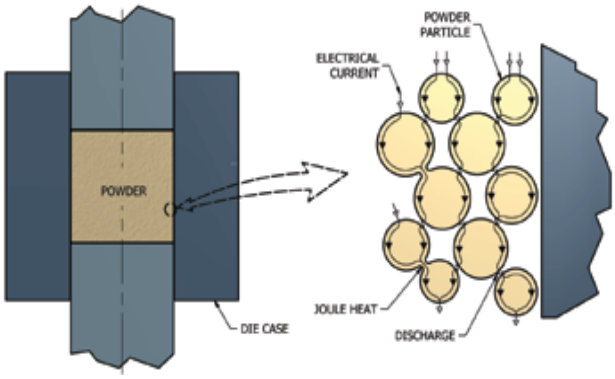
[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]



شکل ۱۰–زمان استاندارد قطع و وصل شدن پالس‌های جریان در فرآیند SPS [7]

فرآیند SPS در برخی موارد شباهت‌هایی به روش پرس داغ دارد؛ مثلاً در هر دو روش پودر اولیه داخل قالب قرار می‌گیرد و یا در هر دو فرآیند، اعمال فشار محوری بر روی نمونه در تمام طول مدت انجام عملیات زینترینگ ادامه داشته و می‌تواند تغییر کند. با این وجود، در روش SPS به جای منبع حرارت خارجی، با عبور پالس‌های جریان مستقیم از پانچ‌ها (الکترودها)، قالب و پودر، حرارت داخل نمونه تولید می‌شود. بدیهی است که عبور جریان از قالب باعث گرم شدن آن می‌شود، بنابراین قالب به عنوان یک منبع حرارت خارجی عمل کرده و پودر هم به صورت داخلی و هم به صورت خارجی تحت حرارت‌دهی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، استفاده از پالس‌های جریان مستقیم باعث می‌شود تا نمونه داخل یک میدان الکتریکی قرار گرفته و سرعت انتقال جرم افزایش یابد[7,16].

باید به این نکته توجه داشت که پالس‌های جریان فقط از پودرهای هادی جریان الکتریسیته عبور می‌کنند. مثلاً در فرآیند تف‌جوشی Si_3N_4 به روش SPS، چون این پودر سرامیکی نه رسانا و نه نیمه رساناست، بنابراین مکانیزم عبور پالس‌های جریان از سطح ذرات پودر (شکل۱۱) قابلیت اجرایی ندارد. علاوه بر این، در تشکیل جرقه پلاسما و تولید فشار ناشی از ضربه پلاسما در فرآیند زینترینگ Si_3N_4 تردیدهایی وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اصلی‌ترین و مهمترین مکانیزم فعال در فرآیند SPS برای Si_3N_4، تولید میدان الکتریکی قوی در اثر قطع و وصل شدن پالس‌های جریان است. این میدان الکتریکی از طریق افزایش سرعت نفوذ و انتقال جرم باعث پیشرفت فرآیند زینترینگ می‌شود. بر این اساس میزان چگالش در روش SPS بستگی به مسیر عبور پالس‌های جریان (از قالب یا نمونه) دارد. به عبارت دیگر هدایت الکتریکی پودر تعیین‌کننده میزان چگالش نمونه خواهد بود. بسته به هندسه قالب و نمونه و مقاومت الکتریکی ویژه آن‌ها، مسیر عبور پالس‌های جریان می‌تواند متفاوت باشد که باعث تولید یک شیب حرارتی در حین انجام فرآیند SPS به ویژه در قسمت‌های مختلف پودر می‌شود. چنانچه حجم پودر زیاد باشد یا نمونه مخلوطی از چند پودر مختلف باشد، این شیب حرارتی بیشتر خواهد بود (به دلیل متفاوت بودن مقاومت الکتریکی پودرها)[11].



شکل ۱۱–مسیر عبور جریان در پودرهای هادی جریان الکتریسیته [2]

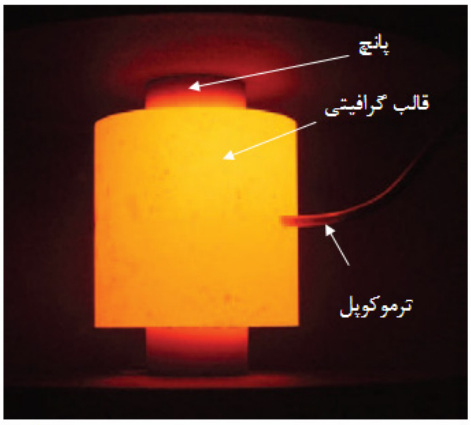
[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

یکی از مهمترین تأثیرات پالس‌های جریان DC در فرآیند SPS، فعال‌سازی سطح ذرات پودر می‌باشد. به این ترتیب که تخلیه الکتریکی ایجاد شده در فاصله بین ذرات پودر باعث شکسته شدن لایه‌های اکسید سطحی شده و با شکسته شدن این فیلم‌های سطحی، قوس الکتریکی (جرقه) ایجاد می‌شود. علاوه بر این پدیده تخلیه الکتریکی می‌تواند باعث یونیزه شده گاز موجود در فواصل بین ذرات پودر شده و بنابراین منجر به تولید پلاسما شود. مجموع عوامل فوق، فعال‌سازی فیزیکی سطح ذرات پودر را موجب می‌شود[11,16]. با توجه به مطالب گفته شده در بالا تأثیرات پالس‌های جریان را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- تولید حرارت موضعی روی سطح ذرات پودر، ۲- شکستن فیلم‌های سطحی عایق ایجاد شده روی ذرات پودر (فعال‌سازی سطحی)؛ ۳- افزایش سرعت نفوذ (افزایش سرعت زینترینگ)؛ ۴- تمیز کردن فصل مشترک و ایجاد پیوند قوی بین ذرات؛ ۵- تخلیه الکتریکی در فاصله بین ذرات پودر که می‌تواند منجر به تولید پلاسما شود؛ ۶- تولید جرقه (اسپارک) در اثر تخلیه الکتریکی؛ ۷- تجمع بارهای الکتریکی در فیلم‌های سطحی عایق ایجاد شده روی ذرات پودر.

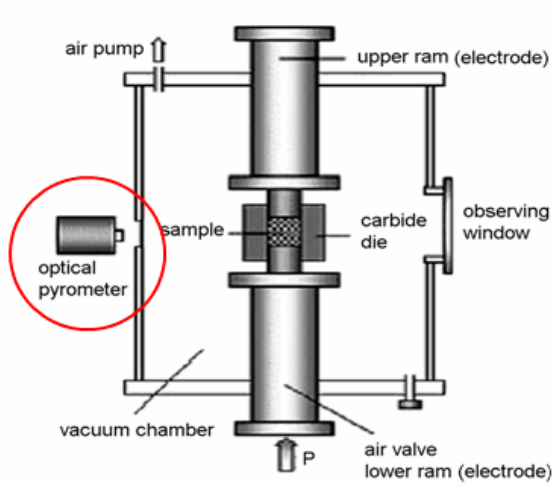
۲-۶-اندازه گیری دما در روش SPS

برای اندازه‌گیری دما در ماشین SPS از دو روش استفاده می‌شود: ۱- استفاده از ترموکوپل برای دماهای زینترینگ پایین‌تر از ۱۰۰۰°C و ۲- استفاده از پیرومتر برای دماهای زینترینگ بالاتر از ۱۰۰۰°C. با قرار دادن ترموکوپل در داخل حفراتی با عمق‌های مختلف (۱-۲mm) دمای قسمت‌های درونی قالب را می‌توان اندازه گرفت (شکل ۱۲). برای اندازه‌گیری دمای دیواره خارجی قالب نیز از پیرومتر استفاده می‌شود (شکل ۱۳). البته دمای اندازه گیری شده معمولاً کمتر از دمای واقعی نمونه است. مقدار تفاوت بین این دو دما به فاکتورهایی مثل هدایت حرارتی قالب و نمونه، نرخ حرارت‌دهی، میزان فشار اعمالی، نحوه عایق بندی قالب و ... بستگی دارد. با این وجود اندازه‌گیری دمای داخل نمونه با مشکلاتی روبه روست. به عنوان مثال، استفاده از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای نمونه نیازمند تخریب نمونه است. علاوه براین ترموکوپل دما را به صورت موضعی اندازه‌گیری می‌کند. یکی از روش‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری دمای نمونه، مشاهده استحاله‌های فازی داخل نمونه است (روش غیرمستقیم). این روش نیز دارای مشکلاتی است از جمله: ۱- استحاله‌های فازی فقط در وضعیت تعادل سیستم رخ می‌دهند این درحالیست که روش SPS یک فرآیند بسیار سریع است که خارج از حالت تعادل رخ می‌دهد؛ ۲- این روش مختص موادی است که در آن‌ها استحاله فازی رخ می‌دهد؛ ۳- همانند استفاده از ترموکوپل، این روش نیز یک روش مخرب است؛ ۴- این روش فقط برای موادی قابل استفاده است که استحاله‌های فازی و دمای استحاله در آن‌ها مشخص باشد؛ ۵- این روش از دقت مناسبی برخوردار نیست. مولنات و همکارانش[13] با استفاده از مدل المان محدود (FEM) روشی را برای پیش‌بینی و کنترل دما در ماشین SPS پیشنهاد کرده‌اند.



شکل ۱۲- استفاده از ترموکوپل برای اندازه گیری دما در روش SPS [10]

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]



شکل ۱۳- استفاده از پیرومتر برای اندازه‌گیری دما در روش SPS [10]

۲-۷- شبیه‌سازی تغییرات میدان حرارتی و میدان الکتریکی در فرآیند SPS

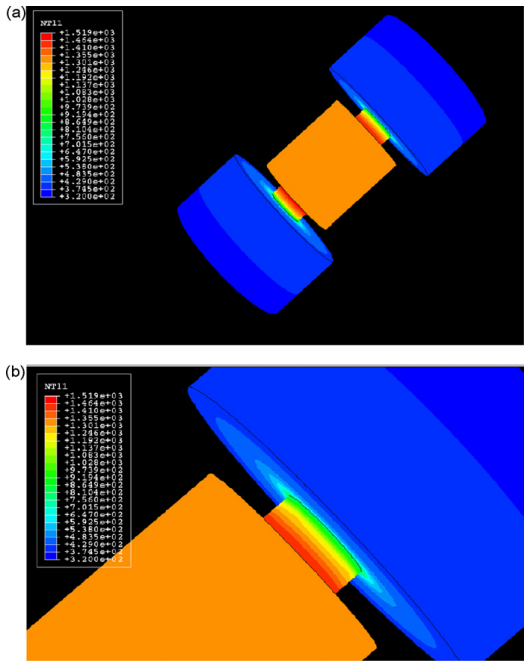
به طور کلی سه عامل اصلی که باعث پیشرفت فرآیند SPS می‌شوند عبارتند از:۱- پالس‌های جریان، ۲- حرات ایجاده شده در اثر تخلیه الکتریکی و ۳- فشار اعمالی. ازآنجایی‌که نرخ حرارت‌دهی و افزایش دما در روش SPS بسیار بالاست بنابراین بررسی میدان دمایی در حین انجام فرآیند زینترینگ مهم به نظر می‌رسد. به عنوان نمونه زمانیکه پودر نیکل در محفظه SPS در حال زینتر شدن است، اختلاف دمایی بین مرکز نمونه با سطح قالب بیشتر از ۱۳۰°C می‌باشد. بنابراین پی بردن به نحوه توزیع دما و فاکتورهای مؤثر بر آن به منظور بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند (مثل دما و فشار) و کنترل آن‌ها بسیار مهم خواهد بود[14,16].

تغییرات میدان دمایی در فرآیند SPS تاکنون توسط افراد زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی‌ها که معمولاً در حالت دوبعدی و به وسیله مدل المان محدود (FEM) انجام شده است، یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر بر میدان دمایی را نرخ حرارت‌دهی معرفی می‌کند. اخیراً تحقیقات مشابهی نیز به منظور شبیه‌سازی میدان الکتریکی و دانسیته جریان در طی فرآیند SPS انجام شده است. در این تحقیقات مشخص شده است که غیریکنواختی توزیع دما در نمونه‌های هادی جریان (مانند پودر مس) بسیار بیشتر از نمونه‌های عایق است که این غیریکنواختی توزیع دما در پودرهای هادی جریان اغلب منجر به تبخیر سطحی آن‌ها می‌شود. با شبیه‌سازی تغییرات میدان الکتریکی در حین فرآیند تفجوشی می‌توان تأثیرات پالس‌های جریان و دانسیته جریان را بر ریزساختار نمونه و رشد گلویی مشخص کرد. در تحقیقاتی که توسط تیواری و همکارانش انجام شده است نتایج شبیه‌سازی میدان دمایی و میدان الکتریکی (دانسیته جریان الکتریکی) به صورت زیر گزارش شده است:

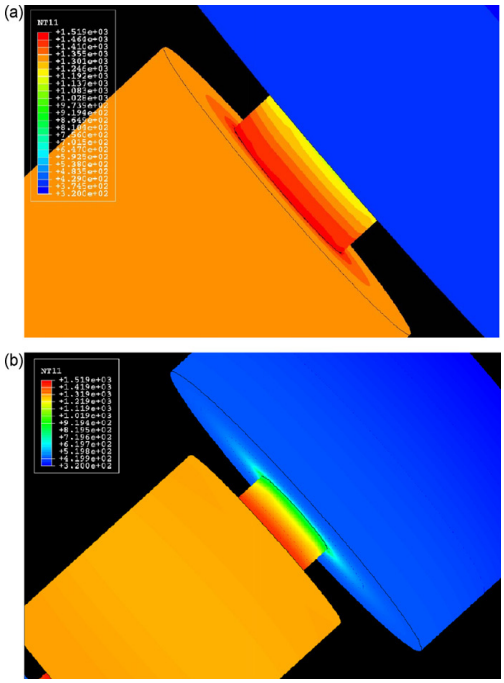
۲-۷-۱- میدان دما

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تغییرات میدان دمایی در قسمت‌های مختلف قالب گرافیتی و سنبه‌ها را پس از گذشت ۴۵۰ ثانیه از فرآیند SPS نشان می‌دهد. شکل ۱۶ نیز تغییرات میدان دمایی را پس از ۹۰ ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر می‌توان گفت، بیشترین افزایش دما در طی مراحل اولیه فرآیند، در سنبه‌ها مشاهده می‌شود. مقداری از حرارت تولید شده به داخل نمونه نفوذ کرده و قسمتی از آن نیز در قسمت بالایی و پایینی سنبه‌ها توسط سیستم آبگرد تلف می‌شود. با پیشرفت فرآیند، دمای نمونه به دلیل هدایت حرارتی پانچ‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تشعشع حرارتی سطحی نیز باعث تلف شدن بخش دیگری از گرمای مجموعه قالب/ نمونه می‌شود. این الگوی حرارتی بیان کننده یک شیب حرارتی بین سطح قالب و مرکز نمونه است بطوریکه این شیب از مرکز نمونه به طرف سطح قالب کاهش می‌یابد.[12]

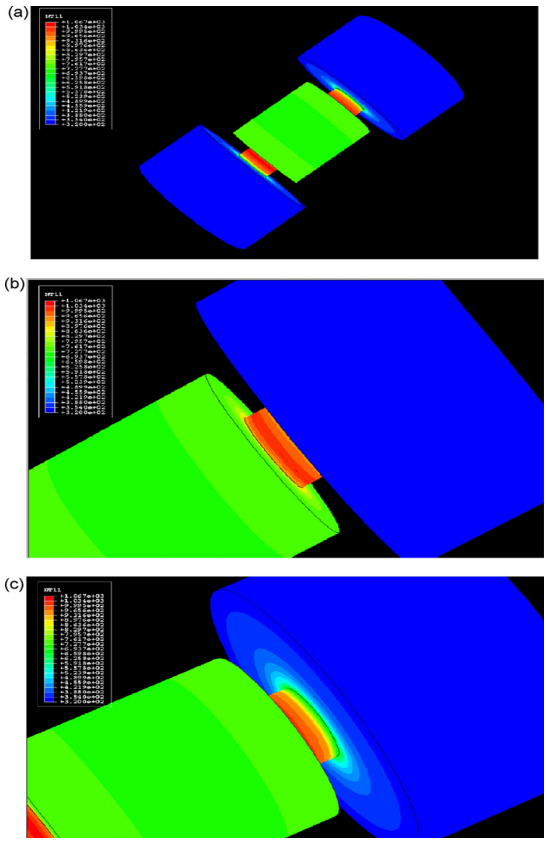
[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]



شکل ۱۴- شبیه‌سازی توزیع دما در سطح قالب و پانچ‌ها پس از گذشت ۴۵۰ ثانیه از فرآیند SPS: (a) شمای کلی مجموعه قالب/پانچ/صفحه گرافیتی و (b) قسمت بالایی پانچ و محل اتصال پانچ/صفحه گرافیتی[12]



شکل ۱۵- شبیه‌سازی توزیع دما در سطح قالب و پانچ‌ها پس از گذشت ۴۵۰ ثانیه از فرآیند SPS: (a) سطح قالب گرافیتی و (b) محل اتصال پانچ/صفحه گرافیتی[12]

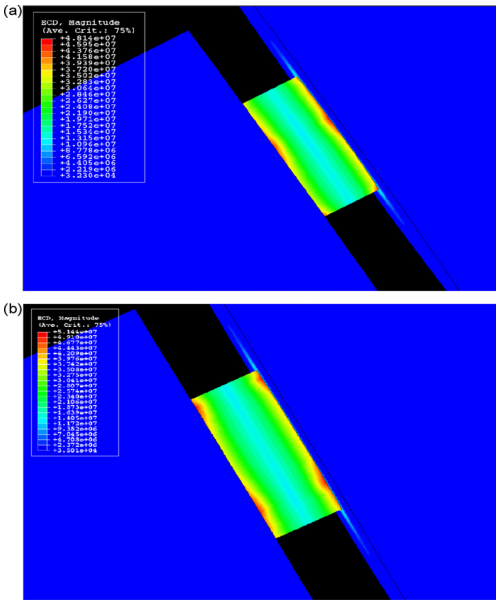


شکل ۱۶- شبیه‌سازی توزیع دما در سطح قالب و پانچ پس از گذشت ۹۰ ثانیه از فرآیند SPS: (a) شمای کلی مجموعه قالب/پانچ/صفحه گرافیتی؛ (b),(c) محل اتصال پانچ/صفحه گرافیتی[13]

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

۲-۷-۲- میدان الکتریکی

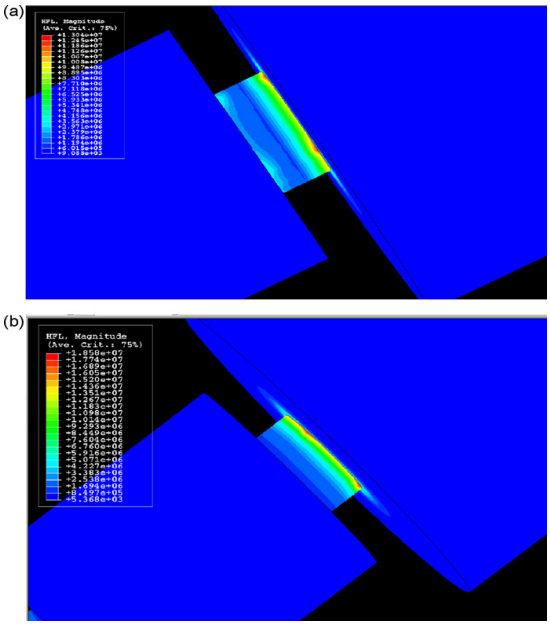
شکل ۱۷ تفاوت توزیع چگالی جریان (ECD) را در سطح پانچ و قالب نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود جریان الکتریکی در قسمتی از پانچ که خارج از قالب قرار دارد، به دلیل داشتن کوچکترین سطح مقطع، ماکزیمم است (قسمت قرمز رنگ). اگرچه بزرگی مقدار جریان در طول فرآیند زینترینگ متغیر است اما الگوی دانسیته جریان عملاً مستقل از زمان فرآیند است. بنابراین پانچ‌ها بیشترین مقدار ECD را تجربه کرده و از آنجایی‌که حرارت‌دهی با ECD رابطه مستقیم دارد، پس حرارت‌دهی در این قسمت پانچ بیشترین مقدار است. به هر حال، این شبیه‌سازی نشان‌دهنده وجود کمترین مقدار ECD در سطح قالب و یک حد متوسط ECD در پانچ می‌باشد.



شکل ۱۷- شبیه‌سازی توزیع دما در سطح قالب و پانچ در فرآیند SPS پس از کذشت (a) ۴۵۰ ثانیه و (b) ۹۰ ثانیه [13]

۲-۷-۳- شار حرارتی

نتایج شبیه‌سازی شار حرارتی در دو حالت قبلی در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۸- شبیه‌سازی توزیع حرارت روی سطح قالب و پانچ در فرآیند SPS پس از گذشت: (a) ۹۰ ثانیه و (b) ۴۵۰ ثانیه [۱۳].

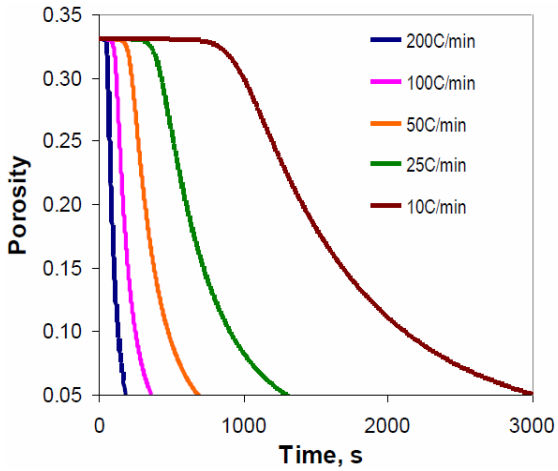
[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

از آنجایی‌که پانچ‌ها بیشترین مقدار دما را با کمترین سطح مقطع دارا می‌باشند، بنابراین یک شیب حرارتی مشخص را در پانچ‌ها برای هر دو حالت فوق می‌توان مشاهده کرد. برای مثال، غیریکنواختی شار حرارتی در محل اتصال قالب/ پانچ در زمان نگهداری ۹۰ ثانیه بیشتر از زمان نگهداری ۴۵۰ ثانیه می‌باشد. در هر دو حالت، فصل مشترک بالایی پانچ شار حرارتی بیشتری دارد که در شکل توسط ناحیه قرمز رنگ نشان داده شده است. گرادیان شار حرارتی می‌تواند به دلیل تولید حرارت غیریکنواخت در مجموعه قالب/ نمونه باشد[16].

۲-۸- مزایا و ویژگی‌های فرآیند SPS

۱- از آنجایی‌که دمای مورد استفاده در روش SPS (یعنی ۲۰۰-۲۴۰۰°C) معمولاً ۲۰۰-۱۰۰۰°C کمتر از روش‌های زینترینگ معمولی است، بنابراین این روش را جزء روش‌های زینترینگ دما پایین طبقه‌بندی می‌کنند. مراحل فرآیند SPS (اعمال فشار، افزایش دما و زمان نگهداری) در یک دوره زمانی کوتاه (۵-۲۵min) انجام می‌شود. دمای نسبتاً پایین و انجام سریع پروسه (زمان کم)، امکان کنترل میکروساختار و رشد دانه‌ها را به ویژه در مواد نانوساختار فراهم می‌کند[2-4].

۲- همانطور که قبلاً ذکر شد، در فرآیند SPS از پالس‌های جریان DC با آمپر بالا برای تولید جرقه پلاسما بین ذرات استفاده می‌شود. فشار می‌تواند تا ۳۰۰ تن افزایش یابد و محفظه نیز تحت فشار اتمسفری منفی (خلأ) در حضور گاز خنثی یا بدون گاز خنثی قرار دارد. پس از تولید جرقه در فضای بین ذرات پودر، حرارت در سطح ذرات متمرکز شده و هر ذره به طور کامل و یکسان با ذرات اطراف خود پیوند برقرار می‌کند. در فشارهای زیاد، تغیر شکل پلاستیک ملایم در ذرات پودر، رسیدن به دانسیته‌های بسیار بالا را تضمین می‌کند. این درحالیست که در فشارها و دماهای پایین و زمان کم می‌توان قطعاتی با تخلخل زیاد تولید کرد (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- تأثیرات نرخ حرارت دهی بر درصد تخلخل [15]

۳- فرآیند SPS قابلیت زینترینگ مواد غیرمشابه را بدون ورود به منطقه فاز مذاب (در مواد دما پایین)، دارا می‌باشد. استفاده از این روش برای تولید مواد کامپوزیتی احتمال یکنواختی ساختار حتی در دانسیته‌های پایین‌تر را افزایش می‌دهد. همچنین در مواد لایه‌ای یا FGMها، لایه‌های پیش‌ساخته[۳۳]، از لحاظ دانسیته و شکل کاملاً ثابت باقی می‌مانند؛ حتی اگر این مواد خواص زینترینگ کاملاً متفاوتی داشته باشند[2].

۴- در روش‌های زینترینگ سریع مثل SPS، SHS، ماکروویو و ... افزایش دمای سیستم به وسیله خود گرمایی از داخل ذرات پودر اتفاق می‌افتد. البته در بعضی از دستگاه‌های SPS از یک منبع حرارتی خارجی نیز برای گرم کردن پانچ‌ها و قالب استفاده می‌شود[3,4,12].

۵- در روش SPS فقط چند دقیقه برای تکمیل فرآیند زینترینگ در مقایسه با روش‌های معمولی تفجوشی (که چندین ساعت یا حتی چند روز طول می‌کشند) لازم است. به چند دلیل: اولاً از آنجایی‌که در روش SPS دمای نمونه از داخل آن افزایش می‌یابد، بنابراین نرخ حرارت‌دهی بالا بوده که این امر منجر به کاهش زمان لازم برای زینترینگ و افزایش سرعت تولید می‌شود (در

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

روش‌های زینترینگ معمولی، حرارت‌دهی به نمونه از خارج آن صورت می‌گیرد)؛ ثانیاً زمان تف‌جوشی در روش SPS به علت زمان کوتاه نگهداری نمونه در دمای زینترینگ، به ۵ تا ۱۰ دقیقه کاهش می‌یابد. این در حالیست که در روش‌های زینترینگ معمولی این زمان تا ساعت‌ها به طول می‌انجامد؛ ثالثاً نرخ حرارت‌دهی در کوره‌های معمولی، غالباً ۵–۸°C/min است که می‌تواند تا ۱۰°C/min افزایش یابد. بنابراین رسیدن به دمای ۱۲۰۰°C در این کوره‌ها به زمانی نزدیک به ۲ تا ۴ ساعت نیاز دارد. اما در روش SPS نرخ حرارت‌دهی حتی از ۳۰۰°C/min تجاوز می‌کند؛ بنابراین در این روش برای رسیدن به دمای ۱۲۰۰°C فقط به ۴ دقیقه زمان نیاز است.

۶– از لحاظ اقتصادی ، هزینه‌های روش SPS به دلیل سرعت بالای تولید (زمان کم)، ٪۸۰–۵۰ کمتر از روش‌های زینترینگ معمولی است. در برخی از کاربردها، تکنولوژی SPS حدود ۲۰ برابر سریعتر از روش‌های زینترینگ معمولی می‌باشد، بطوری‌که زمان زینتر در روش SPS فقط چند دقیقه است اما در روش‌های معمولی زمان زینترینگ حتی ممکن است به چند ساعت نیز برسد[16].

۷– استفاده همزمان از دما و فشار در روش SPS منجر به چگالش بالا شده و بنابراین دمای زینترینگ برای رسیدن به قطعه متراکم نسبت به روش‌های زینترینگ معمولی؛ ۲۰۰ تا ۲۵۰°C کمتر است. از طرف دیگر نرخ حرارت‌دهی بسیار بالا (در حدود ۶۰۰°C/min) باعث افزایش سرعت تف‌جوشی شده و قطعات با دانسیته نزدیک به ٪۱۰۰ در عرض چند دقیقه تولید می‌شوند، (در روش SPS چون درشت شدن و رشد دانه رخ نمی‌دهد، رسیدن به دانسیته نسبتاً بالا در زمان بسیار کوتاهی انجام می‌شود). علاوه براین، زینترینگ نانوپودرها که به روش‌های معمولی قابل انجام نیست را می‌توان به روش SPS و بدون رشد دانه انجام داد. پس با استفاده از این روش، می‌توان سرامیک‌های نانوساختار و نانوکامپوزیت‌ها را با عیوب کمتر و دانسیته بالاتر تولید کرد. این نانوکامپوزیت‌ها خواص مکانیکی بسیار عالی نظیر استحکام و سختی بالایی از خود نشان می‌دهند[1,7].

۸– به علت نرخ بالای حرارت‌دهی و زمان نگهداری کم، در روش SPS، می‌توان واکنش‌های ناخواسته را محدود کرده و بنابراین از تشکیل فازها و محصولات نامطلوب جلوگیری کرد.

۹– پلاسمای ایجاد شده بین ذرات پورد علاوه بر تسهیل فرآیند زینترینگ، به حذف ناخالصی‌ها از سطح ذرات (به دلیل برخورد شدید یون‌های ایجاد شده در ناحیه پلاسما به سطح ذرات پودر) کمک کرده و منجر به اتصال مستقیم ذره/ ذره می‌شود. در نتیجه نفوذ مرزدانه‌ای افزایش یافته و پیوندی قوی بین ذرات برقرار می‌شود. به عنوان مثال پودر آلومینیوم به دلیل وجود یک لایه سطحی از اکسید آلومینیوم بر روی ذرات پودر، یکی از انواع پودرهایی است که به سختی زینتر می‌شود. برای ایجاد اتصال قوی بین ذرات پودر آلومینیوم و رسیدن به دانسیته‌های بالا باید این لایه اکسیدی به نحوی شکسته شود. با استفاده از روش SPS به راحتی می‌توان این لایه اکسیدی را حذف کرده و به دانسیته‌های بالا دست یافت[16].

۱۰– فرآیند SPS راندمان حرارتی بسیار بالایی دارد. زیرا قالب گرافیتی و ذرات پودر مستقیماً به وسیله اسپارک ایجاد شده توسط پالس‌های جریان، گرم می‌شوند.

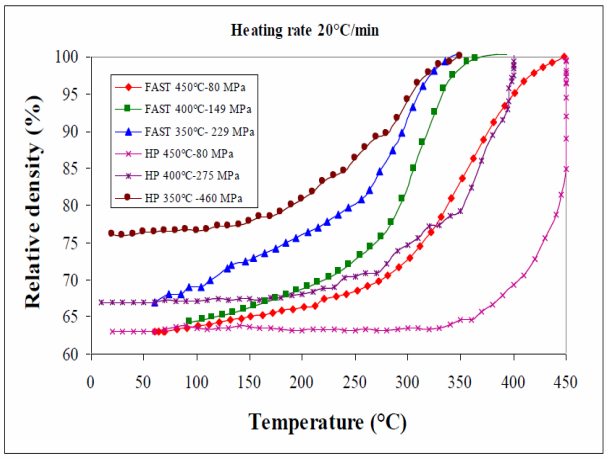
۱۱– یکی از تفاوت‌های اساسی روش SPS با سایر روش‌های زینترینگ، فعال‌سازی فیزیکی سطح ذرات پودر است. این فعالیت سطحی به همراه چگالش سریع در دماهای پایین تر، رشد دانه و انقباض را به شدت محدود کرده و بنابراین ساختار ریزدانه‌تر با خواص مکانیکی و فیزیکی بهتر حاصل می‌شود.

۱۲– چهار فاکتور اصلی که به افزایش چگالش در فرآیند SPS کمک می‌کنند عبارتند از: سرعت بالای حرارت‌دهی و سرد شدن؛ انتقال حرارت سریع (زیرا خود قالب به عنوان یک منبع حرارتی عمل می‌کند)؛ استفاده از فشار مکانیکی (چون باعث حذف تخلخل‌ها و افزایش نفوذ می‌شود؛ استفاده از پالس‌های جریان DC (پالس‌های جریان علاوه بر گرم کردن پودر، با تولید میدان الکتریکی، سرعت نفوذ را افزایش می‌دهند). به نظر می‌رسد از بین این چهار فاکتور، استفاده از پالس‌های پرانرژی جریان DC بیشترین تأثیر را بر افزایش چگالش دارد.

۱۳– در روش SPS می‌توان از فشارهای بیشتری نسبت به روش‌های معمولی استفاده کرد که این مسئله باعث دستیابی به دانسیته‌های بالا در زمان‌ها و دماهای کمتر می‌شود (شکل ۲۰)[15].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]



شکل ۲۰- مقایسه دانسیته نسبی به دست آمده در روش‌های HP و SPS برای پودر Al-Si-Fe [15]

۱۴- نفوذ سریع اسپارک و حرارت یکنواخت در سرتاسر نمونه باعث تولید قطعه‌ای با کمترین میزان تنش داخلی می‌شود. شکست بسیاری از قطعات به دلیل تنش‌های داخلی و ترک‌های ریز رخ می‌دهد که در اثر انتقال حرارت در روش‌های زینترینگ معمولی به وجود می‌آیند. اما در تکنولوژی SPS دما در خارج و مرکز نمونه تقریباً یکسان بوده و بنابراین ذرات پودر به طور یکنواخت در سرتاسر قطعه بهم متصل می‌شوند. علاوه بر این، سرعت نسبتاً زیاد فرآیند SPS، مقادیر زیادی از تنش‌های داخلی را که در قطعات تولید شده به روش‌های زیینترینگ معمولی وجود دارند، کاهش می‌دهد.

۲-۹-برخی از کاربردهای فرآیند SPS

فرآیند SPS را تقریباً می‌توان برای تمام مواد پودری به کار برد؛ به گونه‌ای که خواص و مشخصه‌های نهایی به دست آمده در این روش با خواص به دست آمده در روش‌های پرس داغ معمولی (HP) و HIP متفاوت باشد. برخی مواد سرامیکی را که می‌توان با این روش زینتر کرد و به دانسیته‌های بالا دست یافت عبارتند از: ۱- اکسیدها مثل: مولایت، Al_2O_3، ZrO_2، MgO، HfO_2، SiO_2؛ ۲- کاربیدها مثل: SiC، B_4C، TaC، TiC؛ ۳- بورایدها مثل: TiB_2، HfB_2؛ ۴- نیتریدها مثل: Si_3N_4، TaN، TiN، AlN [۵]. فرآیند SPS به ویژه برای زینترینگ نانوپودرها بسیار مناسب است. بطور کلی یک ماده بسیار ریز نسبت سطح به حجم بیشتری نسبت به همان ماده اما با ذرات درشت‌تر دارد. این مسئله به همراه فعل و انفعالات رخ داده بین ذرات در اثر متراکم شدن (فشار)، منجر به تقویت مشخصه‌ها و خواص مواد می‌شود.

علاوه بر موارد فوق، با استفاده از روش SPS می‌توان پودرهایی را که تف‌جوشی آن‌ها به روش‌های معمولی بسیار مشکل است، زینتر کرد. از جمله این مواد می‌توان به کامپوزیت‌های پایه فلزی (MMCs)، سرامیک‌های تقویت‌شده توسط الیاف (FRC) ، مواد FGM، آلیاژهای پیشرفته، سرامیک‌های سیالون مواد آمورف، سرامیک‌های فوق دما بالا، مواد ترموالکتریک و ترکیبات بین فلزی اشاره کرد. جدول ۱ برخی از موادی که به روش SPS زینتر می‌شوند را نشان می‌دهد.

جدول ۱- برخی از موادی که به روش SPS زینتر می‌شوند[15]

Classification		Materials for SPS processing
Metals		Fe, Cu, Al, Au, Ag, Ni Cr, Mo, Sn, Ti, W, Be Virtually any metal possible
Ceramics	Oxides	Al_2O_3, Mulite, ZrO_2, MgO, SiO_2,TiO_2, HfO_2
	Carbides	SiC, B_4C, TaC, TiC, WC, ZrC, VC
	Nitrides	Si_3N_4, TaN, TiN, AlN, ZrN, VN
	Borides	TiB_2, HfB_2, LaB_6, ZrB_2, VB_2
	Flourides	LiF, CaF_2, MgF_2
Cermets		Si_3N_4 + Ni, Al_2O_3 + Ni, ZrO_2 + Ni Al_2O_3 + TiC, SUS + ZrO_2, Al_2O_3 + SUS SUS + WC/Co, BN + Fe, WC + Co + Fe
Intermetalic copounds		TAl, $MoSi_2$, Si_3Zr_5, NiAl NbCo, NbAl, $LaBaCuSO_4$, Sm_2Co_{17}
Other materials		Organic materials (polyimide, etc.), composite materials

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]

۳- نتیجه‌گیری

فرآیند SPS به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد می‌تواند در صنایع مختلف مانند صنعت هوافضا، خودروسازی و به ویژه در صنایع نظامی کاربردهای بسیاری داشته باشد. از آنجاییکه مدت زمان زینترینگ مواد در این روش حداکثر تا ۲۰ دقیقه طول می‌کشد بنابراین علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، هزینه و مصرف انرژی، مشخصه‌ها و خواص مواد نیز تقویت می‌شود؛ یعنی مواد استحکام بالا، استحکام بیشتر؛ مواد مقاوم به سایش، مقاومت به سایش بیشتر؛ مواد مغناطیس، خواص مغناطیسی قوی‌تر و ... از خود نشان می‌دهند. بنابراین این روش برای کاربردهایی مثل تسلیحات پیشرفته سبک، صنایع اپتیکی، ابزارهای با استحکام بسیار بالا و ... بسیار مناسب به نظر می‌رسد.

مراجع

[1] Aalund, R., “spark plasma sintering”, Ceramic Industry magazine, 2008.

[2] Hungrıa, T., Galy, J., Castro, A., “Spark Plasma Sintering as a Useful Technique to the Nanostructuration of Piezo-Ferroelectric Materials”, Advanced Engineering Materials, vol. 11, No. 8, pp 615-631, 2009.

[3] Kubota, M., “Solid-state reaction in mechanically milled and spark plasma sintered Al–B_4C composite materials”, Journal of Alloys and Compounds, vol. 504, pp. 319–322, 2010.

[4] Kubota, M., Cizek, P., “Synthesis of Al_3BC from mechanically milled and spark plasma sintered Al-MgB_2 composite materials”, Journal of Alloys and Compounds, vol. 475, pp. 209-215, 2008.

[5] Tokita, M., “Mechanism of Spark Plasma Sintering”, Japanese Society of Powder and Powder Metallurgy, Kyoto, Japan, pp. 729–732, 2001.

[6] Eriksson, M., “Spark plasma sintering and deformation behaviour of Titanium and Titanium/TiB_2 composites”, Licentiate Thesis Division of Inorganic Chemistry, Stockholm University, 2007.

[7] Peng, Hong, “Spark Plasma Sintering of Si_3N_4-Based Ceramics-Sintering mechanism-Tailoring microstructure-Evaluating properties“,Doctoral Dissertation Department of Inorganic Chemistry, Stockholm University, 2004.

[8] Liu, G., Shen, Z., Guillard, F., Jancar, B., Mari, D., Schaller, R., “Spark plasma sintering of metal matrix composites”, international Conference on Safe production and use of nanomaterials, NANOSAFE, 2010.

[9] Amunir, Z., Tamburini, U. Anselmi, “The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method”, Journal of Materials science, vol. 41, pp. 763–777, 2006.

[10] Chakravarty, D., Sundararajan, G., “Spark Plasma Sintering-an emerging sintering tool for industrial applications”, International Advanced Research Center for Powder Metallurgy and New Materials (ARCI), BalapurP.O, A.P. INDIA.

[11] Basu, B., “Some fundamentals on Spark Plasma Sintering as a processing tool to fabricate Biomaterials”, Department of Materials Science and Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur.

[12] Tiwari, D., Basu, B., Biswas, K., “Simulation of thermal and electric field evolution during spark plasma sintering”, Ceramics International, vol. 35, pp. 699–708, 2009.

[13] Molenat, G., Durand, L., Galy, J., Couret, A., “Temperature Control in Spark Plasma Sintering:An FEM Approach”, Journal of Metallurgy, vol. 2010, pp 1-9, 2010.

[14] Li, J., Chen, F., Shen Q., Jiang, H., Zhang, L., “Fabrication and dielectric properties of Si_3N_4–MgO–Al_2O_3 by spark plasma sintering technique”, Materials Science-Poland, Vol. 25, No. 3, pp. 699-707, 2007.

[15] Olevsly, E.A., “Sintering Theory”, San Diego State University, California, USA, 2011.

[16] G.Franceschin, N.Flores-Martinez, “Sintering and Reactive Sintering by Spark Plasma Sintering”, 2018, http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68871

[17] O, Guillon,* J, Gonzalez-Julian, “Field-Assisted Sintering Technology/ Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, andTechnologyDevelopments”,2014.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-10-16]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.2.58.5.7]