

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



تف جوشی و مکانیزم های آن

سنتز نانوساختارها

محمد هادی مقیم - - دکتری تخصصی - مهندسی مواد - دانشگاه شیراز دانشکده فنی و مهندسی گروه

مهندسی مواد

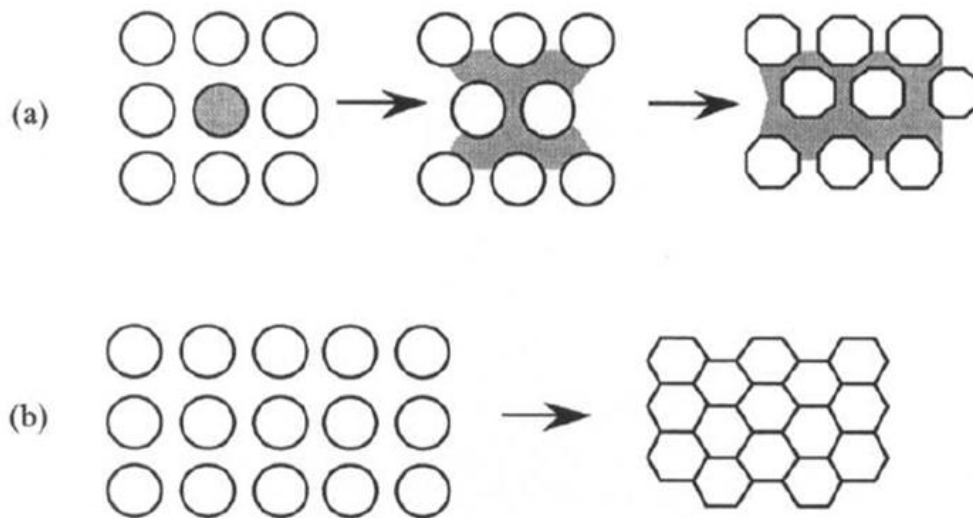
تفجوشی؛ تولید قطعه نانوساختار از ماده اولیه پودری

در این مقاله به بررسی روش حرارتی تفجوشی به عنوان روشی جهت تولید مواد نانوساختار، از ماده اولیه پودری پرداخته خواهد شد. تفجوشی یا سینتر یکی از مهمترین روش‌های شکل‌دهی مواد فلزی و سرامیکی می‌باشد. در این روش ابتدا ماده اولیه، که به صورت پودر است، را پرس کرده و در کوره می‌گذارند و در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر بدست می‌آید. در مبحث حاضر به بررسی انواع تفجوشی، فاکتورهای موثر بر فرآیند تفجوشی، نیروی محرکه تفجوشی و فرآیندهای چگالش در دمای بالا و با اعمال فشار پرداخته خواهد شد.

مقدمه

تفجوشی یا سینتر یکی از روش‌های شکل‌دهی مواد فلزی و سرامیکی است. در این روش ابتدا ماده اولیه، که به صورت پودر است، را پرس کرده و در کوره می‌گذارند. در دماهای بالای کوره، نفوذ اتمی تشدید شده و اتمهای ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می‌چسبانند. در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر بدست می‌آید.

جهت ایجاد پیوند بین ذرات پودری و تهیه یک نمونه یکپارچه و رساندن دانسیته آنها به بالاترین میزان خود و بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی، انجام عملیات تفجوشی در دما و زمان بهینه از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. نیروی محرکه برای تفجوشی و نفوذ جهت پرکردن خلل و فرج موجود در ساختار، کاهش انرژی سطحی است. ایجاد پیوند بین ذرات پودری، تغییر ابعاد قطعه در اثر انقباض‌های ناشی از کاهش اندازه و تعداد حفرات، آزاد شدن تنشهای داخلی، تغییر فاز (مانند تفجوشی حالت مایع) و همچنین انجام واکنشهای شیمیایی وقایعی است که در حین تفجوشی رخ خواهد داد. بطور کلی تفجوشی را می‌توان به دو صورت انجام داد:



شکل ۱ a) -تفجوشی حالت مایع b) تفجوشی حالت جامد

فاکتورهای مؤثر در تفجوشی فاز جامد

عوامل مؤثر بر تفجوشی در فاز جامد عبارتند از:

دما : عامل اصلی انجام فرآیند تفجوشی دماست، بالا رفتن دما موجب تسریع فرآیندهای نفوذی می گردد. اما از طرف دیگر هزینه تولید را نیز بالاتر خواهد برد. میزان فشردگی نمونه خام و همچنین مقدار و نحوه توزیع حفرات، در انتخاب بهترین دمای تفجوشی تأثیر بسزایی دارد.

زمان : زمان تفجوشی در ساختار نهایی تأثیر شدیدی دارد. کوتاه کردن زمان تفجوشی در یک حد بهینه علاوه بر پایین آوردن هزینه های تولید، همانطور که در قسمت قبل نیز توضیح داده شد، از رشد دانه جلوگیری می کند و مانع از جدا شدن حفرات از مرزدانه ها می شود .

دانسیتته خام : هرچه دانسیته خام قطعات اولیه بالاتر باشد، تفجوشی نیز در دما و زمان کمتری منجر به ایجاد قطعاتی با بهترین دانسیته نهایی می گردد. بطور کلی روش تولید در رسیدن به یک دانسیته خام بالا بسیار مؤثر است.

۲-۴ همگنی ساختار خام اولیه : هرچه حفرات موجود در سیستم و همچنین افزودنی‌هایی که به عنوان کمک سینتر به سیستم افزوده می شوند بصورت یکنواخت تر در ساختار پراکنده شوند، نتایج بهتری حاصل خواهد شد. حضور آگلومره ها می تواند یکنواختی سیستم را به شدت تحت تأثیر قرار داده و موجب بجا ماندن حفرات درشت در ساختار گردد .

اتم‌سفر تفجوشی: اتم‌سفر تفجوشی را از دو جنبه فشار و ترکیب می توان مورد بررسی قرار داد. انتخاب مناسب اتم‌سفر کوره علاوه بر اینکه از انجام واکنش‌های شیمیایی نامطلوب جلوگیری می کند و در بعضی موارد موجب خروج بعضی ناخالصیها از سیستم می شود، می تواند از لحاظ فشاری نیز فرآیند تبخیر و چگالش را در حین تفجوشی تحت تأثیر مثبت قرار داده و موجب بهبود خواص قطعه نهایی گردد. اما اتم‌سفرهای شامل گازهای غیر قابل حل نظیر نیتروژن (یا هوا)، آرگون و یا هلیوم می تواند با ایجاد فشار داخلی در حفرات و بالا بردن فشار درونی، از نیروی محرکه انقباض آن کاسته موجب عدم توانایی در رسیدن به دانسیته های بالا شود.

ناخالصی : درصد مناسب ناخالصی جهت جلوگیری از رشد دانه و همچنین جدایش حفرات از مرزدانه ها می تواند سودمند باشد. بسیاری از ناخالصی ها از درشت شدن حفرات نیز در مرحله آخر جلوگیری می نمایند.

نحوه انجام تفجوشی : از نظر اعمال یا عدم اعمال نیرو به یک قطعه جهت تولید قطعاتی با دانسیته بالا می توان روش های تفجوشی را به دو نوع تقسیم نمود :

تفجوشی بدون فشار : در این روش که بسیار ارزانقیمت نیز می باشد، هیچگونه فشار مکانیکی در حین تفجوشی به نمونه اعمال نمی شود. در این حالت نیروی محرکه جهت کاهش حفرات تنها همان کاهش انرژی سطحی است

تفجوشی تحت فشار: در این حالت در حین تفجوشی به نمونه فشاری اعمال می شود، تا فشار اعمالی نیز بعنوان نیرو محرکه، فرآیند چگالش را بهبود بخشد .

امروزه روشهای غیر مرسوم نظیر تفجوشی بکمک امواج میکروویو و تفجوشی به کمک جرقه پلاسمایی نیز وارد عرصه تفجوشی شده اند.

نیروی محرکه تف جوشی

همانند بسیاری از فرآیندهای برگشت ناپذیر، تف جوشی نیز با کاهش انرژی آزاد سیستم همراه است. منابعی که باعث کاهش انرژی آزاد می شود را غالباً نیروی محرکه فرایند تف جوشی می نامند. سه نوع متفاوت از نیروهای محرکه موجودند که عبارتند از: تقعر سطحی، فشار اعمالی و واکنش شیمیایی

تقعر سطحی

در غیاب نیروهای محرکه دیگر تقعر سطحی ذرات به عنوان نیروی محرکه تف جوشی شناخته می شود. برای درک بهتر مطلب یک مول از ماده که شامل ذرات کروی به شعاع a می باشد را در نظر می گیریم. تعداد ذرات عبارتند از:

$$N = \frac{3M}{4\pi a^3 \rho} = \frac{3V_m}{4\pi a^3}$$

در اینجا ρ دانسیته ذرات، M وزن مولکولی و V_m حجم مولی می باشد. مساحت سطحی سیستمی از ذرات عبارتند از:

$$S_A = 4\pi a^2 N = \frac{3V_m}{a}$$

اگر γ_{sv} انرژی مخصوص سطحی ذرات بر واحد سطح باشد، بنابراین انرژی آزاد سطحی ذرات عبارتند از:

$$E_s = \frac{3\gamma_{sv} V_m}{a}$$

در حقیقت E_s نشان دهنده میزان کاهش انرژی آزاد سطحی سیستم، هنگامی که یک جسم با دانسیته تئوری از یک مول از ذرات تشکیل می شود و نیروی محرکه ای برای تف جوشی خواهد بود. البته این محاسبات با عدم در نظر گرفتن انرژی مربوط به مرزدانه انجام شده است و در مواد چندبلور مرزدانه نیز باید در نظر گرفته شود.

فشار اعمالی

در غیاب واکنش های شیمیایی، فشار خارجی اعمالی عموماً بزرگترین سهم را در نیروی محرکه تف جوشی، هنگامی که فشار به قسمت اعظمی از نمونه هنگامی که در دمای لازم برای تف جوشی است اعمال می شود، فراهم می کند. تقعر سطحی را نیز در این مورد می توان به عنوان نیروی محرکه حساب کرد ولی در بسیاری موارد مقدار آن بسیار کم است. برای یک مول از ذرات کار انجام شده روی سیستم با رابطه زیر تقریب زده می شود.

$$W = p_a V_m$$

در این رابطه p_a فشار اعمالی و V_m حجم مولی می باشد W . نیز به عنوان نیروی محرکه برای چگالش به دلیل اعمال نیروی خارجی مطرح می باشد.

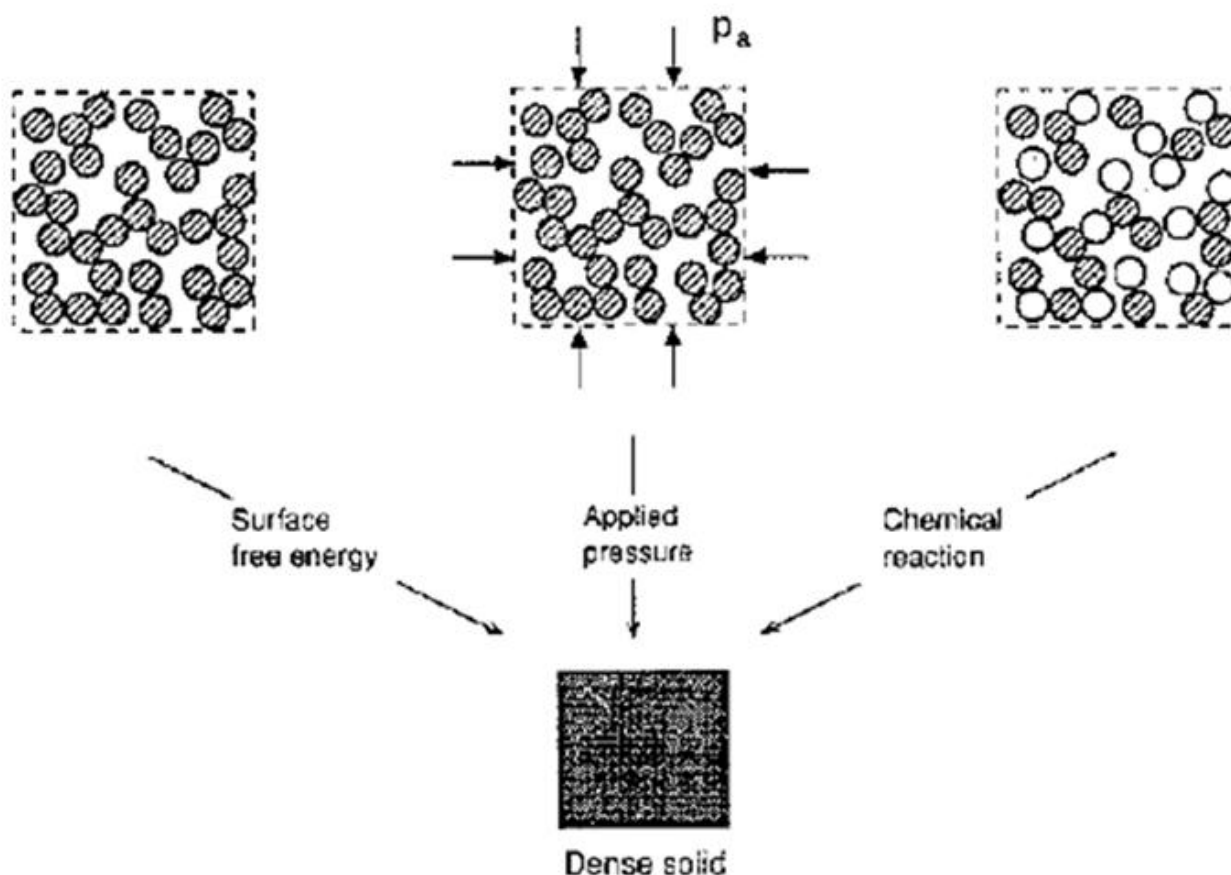
واکنش شیمیایی

واکنش شیمیایی نیز می تواند به عنوان نیروی محرکه فرآیند تف جوشی به حساب آید اگر بتواند به چگالش پودر کمک کند. تغییرات انرژی آزاد هنگام انجام واکنش شیمیایی عبارتند از:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{eq}$$

در واکنش بالا R ثابت گازها ($8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) و T دمای مطلق و K_{eq} ثابت تعادلی واکنش می باشد. این کاهش در انرژی آزاد به مراتب بزرگتر از حالت اعمال فشار می باشد. در عمل واکنش شیمیایی به ندرت در فرآیند چگالش پودر سرامیک های مدرن مورد استفاده قرار می گیرد و این به دلیل عدم کنترل ساختاری سرامیک ها، هنگامی که واکنش شیمیایی همراه تف جوشی اتفاق می افتد، می باشد .

در شکل ۲ شماتیکی از نیروهای محرکه فرآیند تف جوشی نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیکی از نیروهای محرکه فرآیند تف جوشی

چگالش در دمای بالا و با اعمال فشار

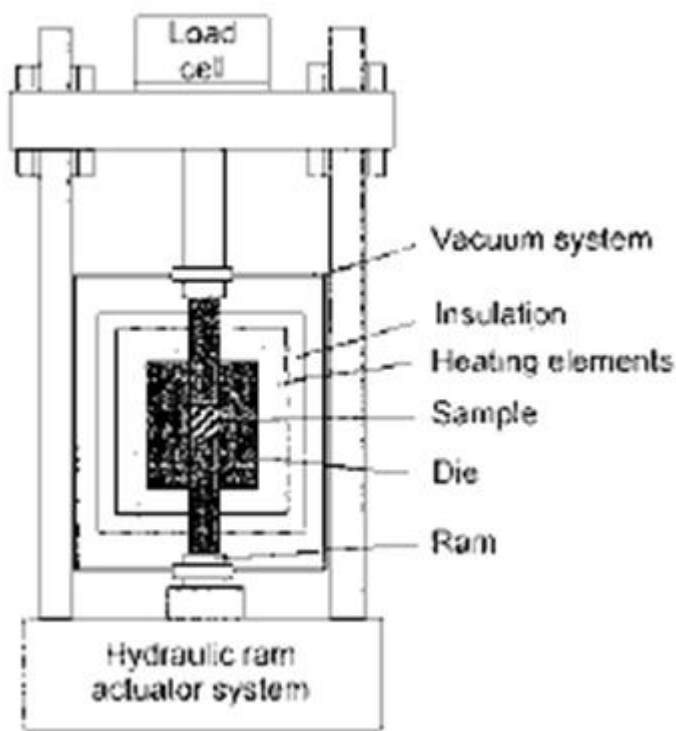
اگر چه در متراکم سازی پودرهای سرامیکی به روش های مختلف و سپس تف جوشی آنها بدون اعمال فشار حین حرارت دهی ازجمله متداولترین روشهای شکل دهی و چگالش سرامیک ها محسوب می شوند، اما در مواردی به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی قطعات تولید شده و یا دستیابی به ریز ساختارهای خاص، مثلاً ساختارهای نانومتری، لازم است از اعمال فشار حین فرآیند تف جوشی به منظور تسهیل نمودن مکانیزم های چگالش و کاهش دما و یا زمان این فرآیند استفاده نمود. اعمال فشار حین عملیات حرارت دهی و تف جوشی قطعات متراکم شده از ذرات پودر به منظور تسهیل و کمک به مکانیزمهای چگالش و در نتیجه کاهش دمای تف جوشی و یا زمان آن برای رسیدن به ساختارهایی کاملاً چگال با اندازه دانه های کوچک صورت می پذیرد. فرآیندهایی که در آنها تف جوشی قطعات در حضور فشار خارجی صورت می گیرد، عمدتاً به سه دسته مستقل تقسیم می شوند که عبارتند از فشردن گرم (Hot Pressing) یا (HP)؛ فشردن هم جانبه در دمای بالا (Hot Isostatic Pressing یا HIP)؛ و فشردن خارج از قالب و در دمای بالا (Sinter Forging یا SF). در ادامه هر یک از روشهای مذکور مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهند گرفت.

فشردن گرم (Hot Pressing) یا (HP)

در فرآیند فشردن گرم HP، فشار بصورت تک محوری بر مجموعه ذرات پودری که قبلاً به روشی شکل دهی شده اند یا در حال شکل دهی هستند، در درون قالب و حین عملیات حرارت دهی و تف جوشی اعمال می گردد. با انجام این عملیات دمای تف جوشی قطعات سرامیکی حداقل ۲۰۰-۱۰۰ درجه سانتی گراد کاهش یافته و دسترسی به دانسیته هایی کاملاً نزدیک به دانسیته تئوری در زمان کوتاه میسر می گردد. بدین ترتیب قطعاتی تولید می گردند که به مراتب دارای خصوصیات مکانیکی و فیزیکی (گذردهی نور و هدایت الکتریکی) برتری بوده و بخصوص برای قطعات سرامیکی درصد اطمینان به عملکرد قطعه و تواناییهای آن (که در مورد سرامیکها بسیار حائز اهمیت

می باشد) شدیداً افزایش می یابد. در هر حال این فرآیند نیز مانند اکثر فرآیندهای صنعتی دارای معایبی نیز می باشد که از آن جمله می توان به هزینه بالای آن و محدودیت در اشکال قابل کاربرد در این فرآیند اشاره نمود .

دستگاهی که با استفاده از آن عملیات فشردن در دمای بالا انجام می پذیرد، بطور کلی شامل یک پرس اصلی و کوره ای می باشد که بازوهای پرس و قالب را احاطه کرده و بطور کامل عایق بندی و از محیط اطراف ایزوله شده است. شکل ۳ شماتیکی از دستگاه پرس گرم را نشان می دهد.



شکل ۳- شماتیکی از دستگاه پرس گرم

فشردن هم جانبه در دمای بالا (Hot Isostatic Pressing) یا (HIP)

در فرآیند فشردن هم جانبه در دمای بالا، نمونه خام که از قبل تحت عملیات فشرده سازی سرد، و یا حتی تحت عملیات تفجوشی اولیه بدون حضور فشار، قرار گرفته است را محکم درون یک ظرف شیشه‌ای یا فلزی و در حضور خلا قرار داده و سپس این ظرف را وارد محفظه فشار همه جانبه کرده تا تحت فشار برابر از هر سوی قرار گیرد. در حین اعمال فشار، نمونه نیز باید در دمای مناسب قرار گرفته تا همزمان با اعمال فشار نمونه تحت فرآیند تفجوشی نیز قرار گیرد

فشردن خارج از قالب و در دمای بالا (Sinter Forging) یا (SF)

سینتر فورج یا فورج گرم مانند فرآیند فشردن گرم است با این تفاوت که نمونه خام درون هیچ قالبی قرار ندارد. مطابق انتظار باید نمونه قبلاً تحت عملیات فشرده سازی سرد قرار گرفته باشد و یا حتی تحت تفجوشی اولیه قرار گرفته باشد و دارای استحکام خام مناسبی باشد تا در حین انجام فرایند، شکل خود را حفظ کند. در این روش کرنش‌های بزرگتری نسبت به پروسه فشردن گرم به نمونه وارد می‌شود و بنابراین جهت ایجاد ساختارهای جهت دار روش بسیار مناسبی می‌باشد.

- تفجوشی یا سینتر یکی از مهمترین روش‌های شکل‌دهی مواد فلزی و سرامیکی می‌باشد و در این روش ابتدا ماده اولیه، که به صورت پودر است، را پرس کرده و در کوره می‌گذارند و در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر بدست می‌آید.
- بطور کلی تفجوشی را می‌توان به دو دسته تفجوشی در حالت جامد و تفجوشی در حضور فاز مایع تقسیم‌بندی کرد.
- مهمترین پارامترهای موثر بر روی تفجوشی شامل دما، زمان، اتمسفر، حضور فشار و ... می‌باشند.
- نیروی محرکه تفجوشی شامل تقعر سطحی، فشار اعمالی و واکنش شیمیایی می‌باشند.

- به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی قطعات تولید شده و یا دستیابی به ریز ساختارهای خاص، مثلاً ساختارهای نانومتری، لازم است از اعمال فشار حین فرآیند تف جوشی به منظور تسهیل نمودن مکانیزم های چگالش و کاهش دما و یا زمان این فرآیند استفاده نمود. این فرآیندها شامل از فشردن گرم؛ فشردن هم جانبه در دمای بالا؛ و فشردن خارج از قالب و در دمای بالا است.

مکانیزم ها و مراحل تفجوشی

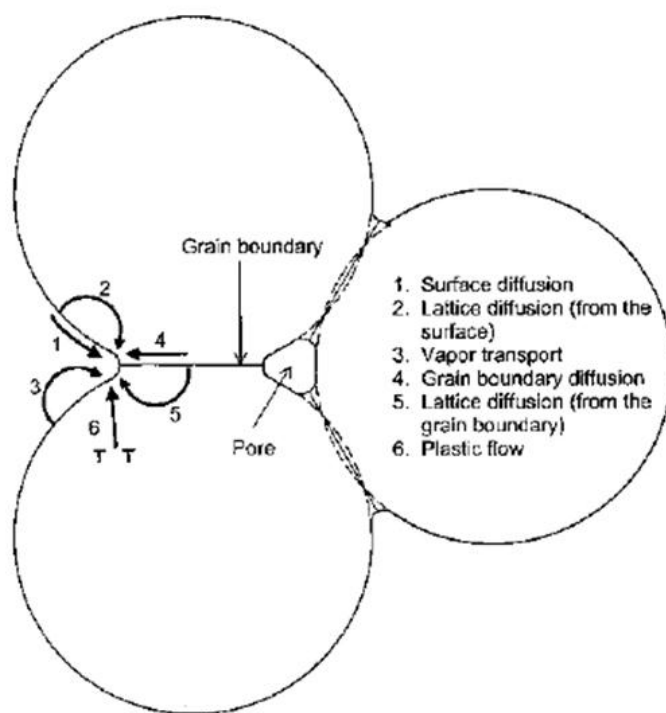
همانطور که اشاره شد تف جوشی یا سینتر یکی از مهمترین روش های شکل دهی مواد فلزی و سرامیکی است که در آن ماده اولیه پودری، را پرس کرده و در کوره می گذارند. در دماهای بالای کوره، نفوذ اتمی تشدید شده و اتمهای ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می چسبانند. در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر بدست می آید. همچنین نیروی محرکه برای تفجوشی و نفوذ جهت پرکردن خلل و فرج موجود در ساختار، کاهش انرژی سطحی بیان گردید.

جهت تبدیل نمونه پودری به یک قطعه با استحکام مناسب و خواص مورد نظر، مکانیزم هایی در دمای بالای کوره اتفاق می افتد و این باعث بروز مراحل در حین پروسه تفجوشی می شود که در این مقاله به آن ها خواهیم پرداخت.

مکانیزم های تفجوشی

فرایند تفجوشی مواد پلی کریستال توسط انتقال ماده از طریق مسیرهای مختلف انجام می شود که مکانیزم های تفجوشی را شامل می شود. مسیر انتقال ماده از نواحی با پتانسیل شیمیایی بالاتر به نواحی با پتانسیل شیمیایی خواهد بود. به طور کلی حداقل شش مکانیزم در تفجوشی مواد پلی کریستال وجود دارد که در شکل ۱ آورده شده است. این مکانیزم ها شامل نفوذ سطحی (Surface Diffusion)، نفوذ شبکه ای (Lattice Diffusion)

از مرز دانه و از سطح، انتقال گاز (Vapor Transport)، نفوذ مرزدانه ای (Grain Boundary Diffusion) و تغییر شکل پلاستیک (Plastic Flow) می‌باشند. مکانیزم‌های تف‌جوشی باعث تشکیل اتصالات شیمیایی بین ذرات پودری شده و بنابراین استحکام نمونه خام، پودرهایی که تحت فشردن سازی سرد قرار گرفته است، در حین پروسه تف‌جوشی افزایش می‌یابد. با این وجود تنها تعدادی از این مکانیزم‌ها باعث انقباض یا چگالش ترکیب پودری می‌گردد. بنابراین می‌توان مکانیزم‌های تف‌جوشی را به دو دسته مکانیزم‌های چگالشی و مکانیزم‌های غیر چگالشی تقسیم‌بندی کرد. بر این اساس مکانیزم‌هایی مانند نفوذ سطحی، نفوذ شبکه‌ای از سطح و انتقال گاز که باعث اتصالات شیمیایی شده ولی نقشی در چگالش پودر ایفا نمی‌کنند در دسته مکانیزم‌های غیر چگالشی؛ و مکانیزم‌هایی مانند نفوذ مرزدانه ای، نفوذ شبکه ای از مرزدانه و تغییر شکل پلاستیک که هم باعث اتصالات شیمیایی شده و هم چگالش پودرها را باعث می‌شوند، در دسته مکانیزم‌های چگالشی قرار می‌گیرند.



شکل ۴- مکانیزم‌های فرآیند تف‌جوشی مواد پلی کریستال

مراحل تفجوشی

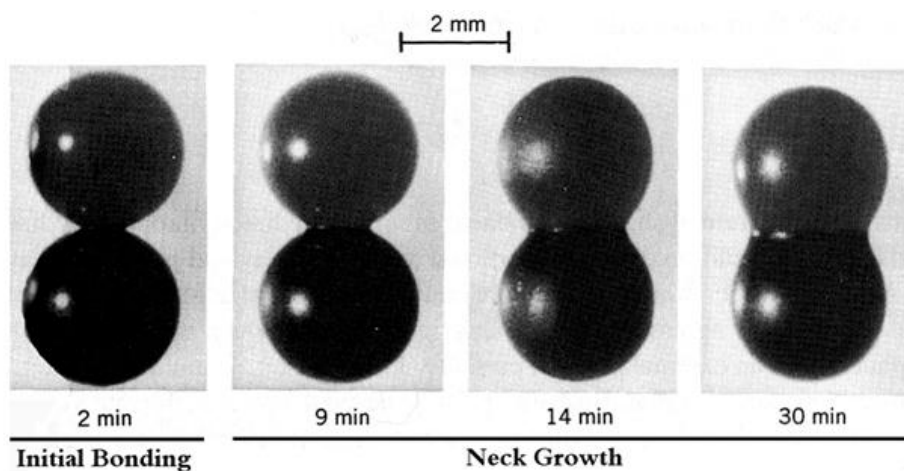
جهت تهیه یک قطعه چگال در حین فرایند تفجوشی در دمای بالا مراحل رخ می دهد. مراحل تفجوشی را می توان بصورت خلاصه چنین بیان نمود:

ایجاد پیوند اولیه بین ذرات پودر (Initial Bonding among Particles)

بیشترین تغییر در میزان استحکام، نه بیشترین استحکام، در این مرحله رخ می دهد، ولی انقباضی در ساختار اتفاق نمی افتد. قطعاتی که نیاز باشد دارای خلل و فرج بالا باشند فرایند تفجوشی آن ها در همین مرحله متوقف می شود. پیوند بین ذرات در این حالت در نقاطی که در تماس کامل با یکدیگر می باشند اتفاق می افتد.

رشد گلوگاه (Neck Growth)

در این مرحله شعاع انحنای گلوگاه، اتصال شیمیایی بین ذرات که به صورت گلوگاه است، تشکیل شده بین ذرات شروع به افزایش می کند. شکل ۵ مراحل ۱ و ۲ تفجوشی را بصورت شماتیک نشان می دهد. در این شکل در مرحله ابتدا پیوند بین دو ذره ابتدا ایجاد می گردد، و در مرحله دوم این اتصال رشد می کند.



شکل ۵ شبیه سازی مرحله اول و دوم تفجوشی به کمک دو گلوله شیشه ای در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

مکانیزمهای مختلفی درمورد انتقال ماده در این مرحله مورد توجه قرار گرفته است. این مکانیزم ها به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است .

جدول ۱ - مکانیزم های حاکم بر تفجوشی در مرحله رشد گلوگاه

Mechanism Number	Transport Path	Source of Matter	Sink of Matter
1	Surface diffusion	Surface	Neck
2	Lattice diffusion	Surface	Neck
3	Vapor transport	Surface	Neck
4	Boundary diffusion	Grain boundary	Neck
5	Lattice diffusion	Grain boundary	Neck
6	Lattice diffusion	Dislocations	Neck

بسته شدن شبکه حفره ها(Pore Channel Closure)

بطور کلی حفرات درون ساختار را می توان به دو دسته تقسیم نمود:

حفرات مرتبط (Interconnected Pores): در این حالت هنوز ارتباط بین حفرات باقیمانده در سیستم از بین نرفته است و این حفرات کماکان در ارتباط هستند .

حفرات منفرد (Isolated Pores): در این حالت حفرات بصورت نقاط مجزا در ساختار وجود دارد و ارتباط آن ها از بین رفته است .

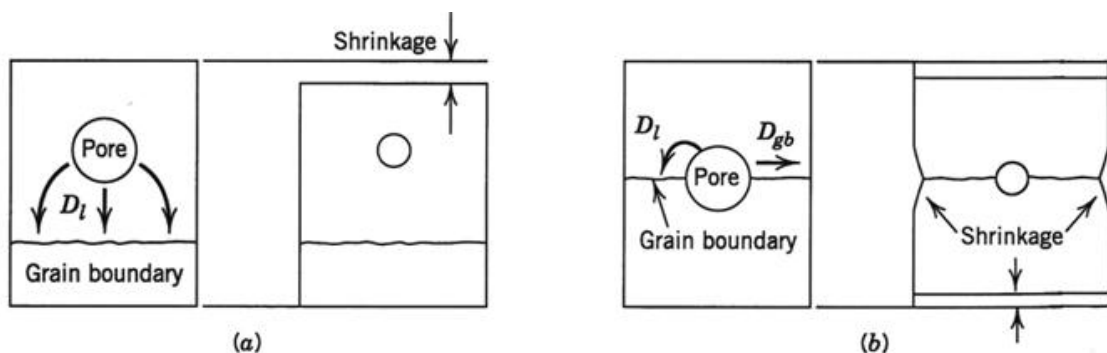
در این مرحله در اثر انجام مکانیزم های نفوذی حفرات از حالت مرتبط به منفرد تبدیل می شوند.

مدور شدن حفرات (Pore Rounding)

همانطور که مشخص است حفرات با شکل های مختلف دارای انرژی های متفاوتی هستند که این موضوع به دلیل سطح ویژه متفاوت آن ها می باشد. در این میان حفرات کروی به دلیل سطح حداقلی خود دارای کمترین انرژی می باشند. در این مرحله در اثر کاهش انرژی سطحی، شکل حفرات از حالت غیر منظم به حالت گرد تبدیل می شود.

چگالش یا انقباض حفره ای (Densification or Pore Shrinkage)

در این مرحله حفرات شروع به از بین رفتن می کنند. مسئله ای که در اینجا بسیار حایز اهمیت است، محل قرار گرفتن حفره جهت انجام فرآیند انقباض است. از سوی دیگر مرزدانه بعنوان یک مسیر مناسب جهت انجام فرآیند نفوذ مطرح می باشد و از بین رفتن حفرات در اثر فرآیند نفوذ وقتی بخوبی انجام می گیرد، که حفرات در مرزدانه حضور داشته باشند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، وقتی حفره ای در مرزدانه قرار دارد، انتقال ماده جهت انقباض آن نه تنها از طریق مرزدانه بلکه از درون دانه نیز انجام می پذیرد. از طرف دیگر انقباض و انتقال ماده یک فرآیند هم جانبه خواهد بود. این در حالیست که در صورت حضور حفره در درون دانه، انقباض آن از هم طرف یکسان نخواهد بود. جدا شدن حفرات از مرزدانه در اثر تحرک بالای آن نه تنها موجب باقیماندن حفرات در ساختار می شود، بلکه موجب عدم رسیدن به دانسیته های بالا در پایان تفجوشی خواهد شد.



شکل ۶ تأثیر جدا شدن یک حفره از مرزدانه و تفاوت مسیر نفوذی در انقباض آن (شکل a: حفره جدا از مرزدانه و نفوذ از درون دانه، شکل b: حفره متصل به مرزدانه و نفوذ از درون دانه و خود مرزدانه)

همانطور که می دانیم یکی از پدیده های مرسوم که هنگام بالا رفتن دما برای تمام مواد پلی کریستال رخ می دهد پدیده رشد دانه است. بزرگ شدن دانه ها خواص مکانیکی مواد را تضعیف می نماید. بنابراین در تمام فرآیندهای تولید جلوگیری از رشد دانه از اهمیت بسیار بالایی برخوردارست. بنابراین هر عاملی که بتواند تحرک مرز دانه یا Mobility آنرا کمتر نماید، می تواند با جلوگیری از رشد دانه در بهبود خواص مکانیکی سودمند باشد. وجود حفرات و همچنین ناخالصی ها با نیروی بازدارنده ای که به مرز وارد می نمایند تحرک آنرا تا حد زیادی کاهش می دهند.

اگر میزان تحرک مرزدانه را با M_b نمایش دهیم و نیروی محرکه حرکت آنرا برابر F در نظر بگیریم آنگاه سرعت حرکت مرزدانه از رابطه زیر تبعیت می نماید.

$$V_b = M_b F$$

هنگامیکه تعداد N عدد حفره در واحد سطح مرزدانه به آن متصل باشند و نیرویی که به مرزدانه وارد می کنند برابر F_p باشد، آنگاه می توان در مورد سرعت حرکت مرزدانه چنین بیان نمود :

$$V_b = M_b (F - NF_p)$$

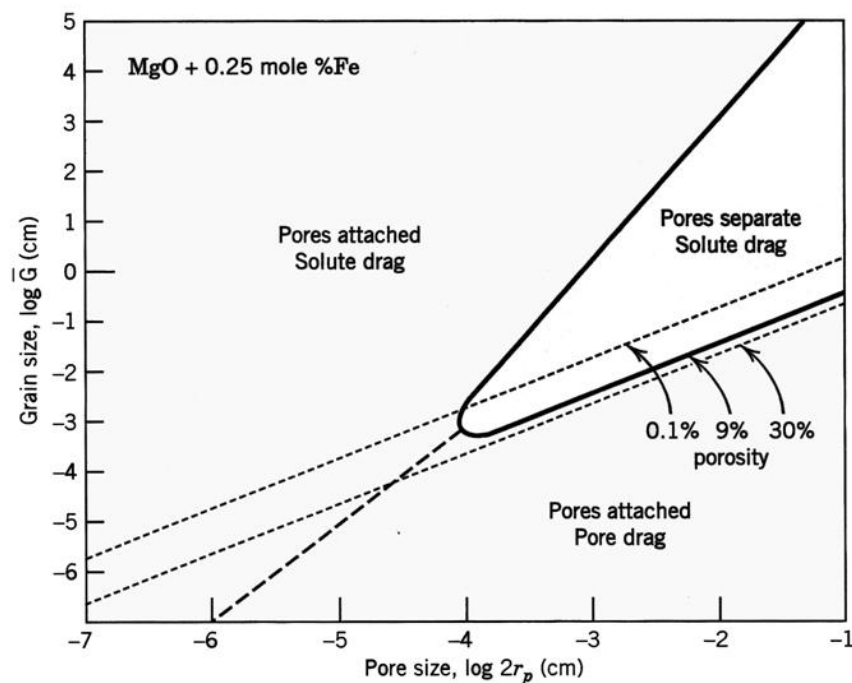
از آنجا که اتصال حفره و مرزدانه به معنی برابر بودن سرعت حرکت ایندو است ، بنابراین داریم:

$$V_b = V_p = M_p F_p$$

بر این اساس میزان تحرک مرزدانه بر اساس رابطه زیر کاهش می یابد:

$$M_{NET} = \frac{V_b}{F} = \frac{M_b M_p}{NM_b + M_p}$$

در مورد این رابطه می توان چنین اظهار نمود که اگر $NM_b \gg M_p$ باشد، آنگاه میزان تحرک مرزدانه از رابطه $M_{NET} = M_p/N$ تبعیت می نماید، که تابع تعداد حفرات متصل به مرز است. در حالت دیگر اگر $NM_b \ll M_p$ نیروی اعمالی از سوی حفرات بر مرزدانه قابل صرفنظر بوده و $M_{NET} = M_b$ خواهد بود. در این حالت حفرات، دیگر نقشی در تحرک مرزدانه ندارند. عامل تعیین کننده در این حالت نیروی بازدارنده ای است که از سوی اتمهای حل شده و ناخالصی ها به مرزدانه وارد می شود. حالت دیگری نیز وجود دارد که تحرک مرزدانه از حفره آنقدر بیشتر است، که مرزدانه براحتی از حفره جدا می شود و حفره بدرون دانه می رود. بر اساس مطالب گفته شده نقشه مربوط به اتصال یا عدم اتصال حفره به مرزدانه در شکل ۷ آمده است.

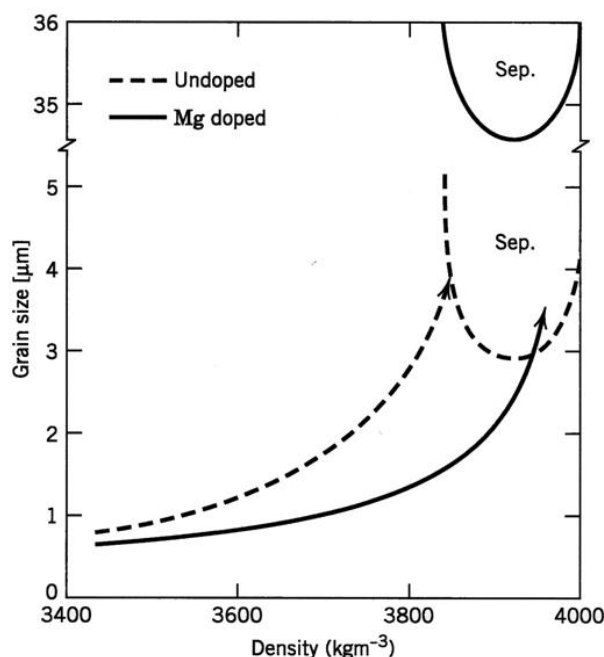


شکل ۷ نقشه حفره- مرزدانه جهت پیش بینی جدایش یا عدم جدایش حفره از مرزدانه

این نقشه شدیداً تابعی از میزان حفرات و همچنین درصد ناخالصی موجود در سیستم می باشد. بر طبق این نقشه، اساس جدایش حفرات از مرزدانه، اندازه حفره می باشد. هنگامی که اندازه حفرات به نسبت اندازه دانه

بزرگ باشد، حفرات بصورت متصل به مرز باقی می مانند و می توان اظهار نمود که عامل مؤثر در کند شدن حرکت مرزدانه همان حفرات می باشد. (Pores attached, Pore drag) اما اگر حفرات به نسبت دانه کوچک باشند، آنگاه وجود یا عدم وجود این حفرات تأثیری در تحرک مرزدانه ندارد و تنها ناخالصیهای موجود در سیستم حرکت مرز دانه را کند می کنند. در این حالت نیز حفرات بصورت متصل باقی خواهند ماند (Pores attached, Solute drag). در حالت سوم اگر اندازه حفرات و دانه ها به یک نسبت بزرگ باشند، جدایش بین حفره و مرزدانه رخ خواهد داد، که مطلوب نیست. (Pores Separate, Solute drag) اندازه حفرات و اندازه دانه نباید به این منطقه بحرانی برسد، در غیر اینصورت چگالش در حین تفجوشی بخوبی انجام نمی گیرد.

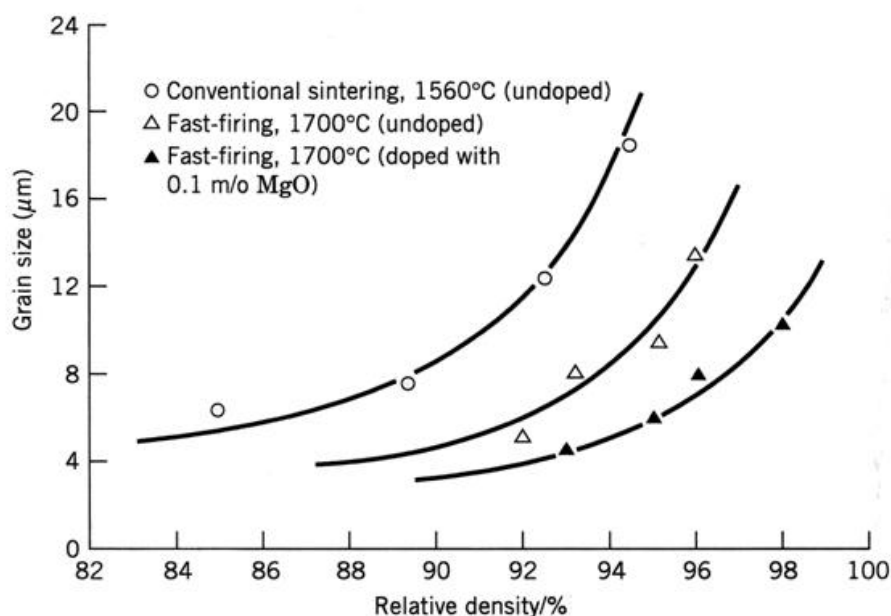
با افزایش دانسیته ماده در حین تفجوشی و افزایش اندازه دانه ها در سیستم امکان تحرک آنها افزایش یافته و امکان جدایش جدایش حفرات از دانه ها بیشتر می شود. نقشه شکل ۵ رسیدن به مرز جدایش بین حفرات و مرزدانه را نشان می دهد. مسیر نشان داده شده در شکل مسیر افزایش اندازه دانه ها برحسب دانسیته می باشد.



شکل ۸ جدا شدن حفرات از مرزدانه با زیاد شدن دانسیته و افزایش اندازه دانه ها در سیستم آلومینا با مقادیر اندکی منیزیم (مسیر نشان داده شده مسیر انجام فرآیند تفجوشی است) خطوط نقطه چین مربوط به عدم حضور ناخالصی در سیستم است

برای جلوگیری از عدم جدایش حفرات از مرزدانه دو راه وجود دارد

- در بسیاری از موارد برای کم کردن سرعت حرکت مرزدانه و جلوگیری از رشد دانه، ناخالصیهایی در حد ppm به سیستم افزوده می شود تا با کم کردن تحرک مرزدانه از جدایش حفرات از مرزدانه جلوگیری کنند. بعنوان مثال در مورد سیستم آلفا- آلومینا اضافه کردن مقادیر جزئی MgO ، SiO_2 ، Y_2O_3 و ZrO_2 می تواند علاوه بر ریز کردن دانه بندی نهایی در رسیدن به دانسیته های بالا نیز مؤثر باشد.
- با افزایش سرعت گرم کردن، پیش از افزایش نرخ رشد دانه، چگالش را در قطعات ایجاد نماییم. شکل ۶ این تأثیر را بخوبی نشان می دهد.

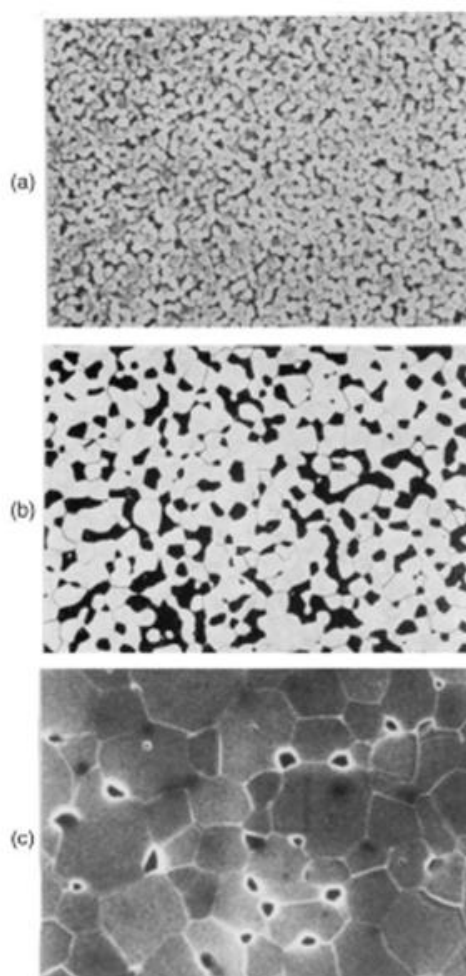


شکل ۹ تأثیر افزایش سرعت گرم کردن در حین تفجوشی و رسیدن به دانسیته های بالا با دانه بندی ریز در سیستم آلومینا

بزرگ شدن حفرات (Pore Coarsening)

در این مرحله حفرات بزرگ به قیمت از بین رفتن حفرات کوچکتر بزرگتر شده و تعداد زیاد حفرات ریز و پراکنده به تعداد کم حفرات درشت بدل می شوند. این موضوع به دلیل تمایل ماده به کم کردن انرژی خود از طریق کاهش سطح حفرات باقی مانده می باشد.

شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپی یک نمونه در مراحل اولیه، مراحل میانی و مراحل پایانی تفجوشی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با پیشرفت فرایند تفجوشی، میزان تخلخل در ساختار کاهش یافته و اتصال شیمیایی بین ذرات ایجاد می گردد .



شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپی یک نمونه در (a) مراحل اولیه، (b) مراحل میانی و (c) مراحل پایانی تفجوشی

نتیجه گیری

- مکانیزم‌ها شامل نفوذ سطحی (Surface Diffusion)، نفوذ شبکه‌ای (Lattice Diffusion) از مرز دانه و از سطح، انتقال گاز (Vapor Transport)، نفوذ مرزدانه ای (Grain Boundary Diffusion) و تغییر شکل پلاستیک (Plastic Flow) می‌باشند که برخی از آنها مکانیزم‌های چگالشی و برخی دیگر مکانیزم‌های غیر چگالشی می‌باشند.
- مراحل تفجوشی شامل ایجاد پیوند اولیه بین ذرات پودر، رشد گلوگاه، بسته شدن شبکه حفره ها، مدور شدن حفرات، چگالش یا انقباض حفره ای و بزرگ شدن حفرات می‌باشد.