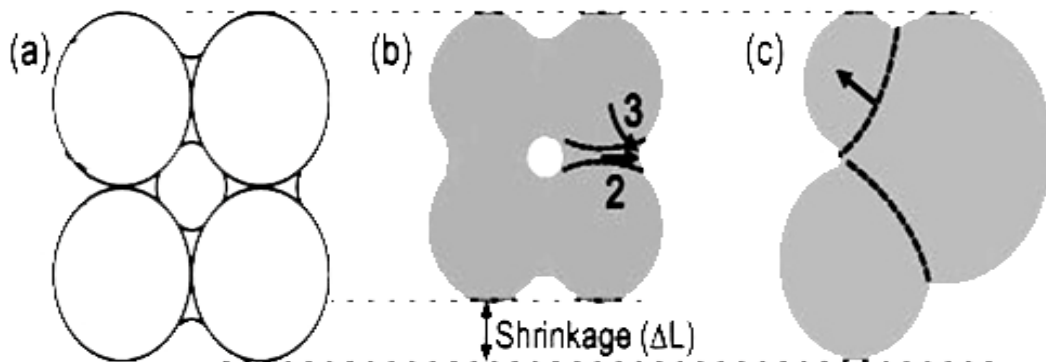


پختن سرامیک ها - محمود سالاریه- از کتاب خشک کردن و پختن سرامیک ها (چاپ دوم)

1- پختن یا زینترینگ (Sintering)

زینترینگ عبارت است از فرآیندی شیمیائی- فیزیکی که طی آن در اثر فاکتورهای مختلفی نظیر دما و فشار، قطعه مورد نظر با واکنش بین مواد جامد با پیوستن و محکم شدن پودرهای سرامیکی به جامدی عموماً پلی کریستال تبدیل شده و به استحکام می رسد. از نظر ترمودینامیکی به جهت ناپایداری سطحی در پودرهای سرامیکی و انرژی آزاد موجود در سطح، سیستم آماده کاهش سطح است، ولی با وجود موانع ترمودینامیکی، این تمایل به کاهش انرژی با افزایش نیروی محرکه از طریق افزایش دما از سد ترمودینامیکی عبور کرده لذا فرآیند زینترینگ یک استحاله برگشت ناپذیر است. مثال مشخص از این تمایل به کاهش سطح را می توان در بهم پیوستن قطرات آب بر روی سطح شیشه و یکی شدن آن ها بیان کرد. در این مورد ابتدا در اثر نیروهای کشش سطحی ناحیه ای بنام گردنه (neck) بین دو قطره ایجاد شده و این گردنه بتدریج وسعت یافته تا سرانجام دو قطره بهم می پیوندند. این فرآیند شبیه همانی است که در زینتر اتفاق می افتد ولی در اینجا بدلیل ویسکوزیته بسیار کم آب، این عمل سریعاً صورت می گیرد در حالیکه در مورد مواد جامد بایستی نیروی محرکه برای عوامل کینتیکی (مثل دما، فشار و زمان) جهت ایجاد تحرک برای به هم پیوستن را برای این نقل و انتقال در نظر گرفت شکل 1.

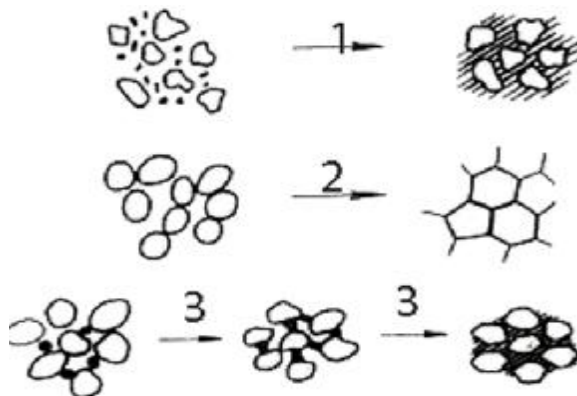


شکل 1- شماتیک مکانیزم های زینترینگ

با اولین نگاه متوجه می شویم که این دگرگونی ها به لحاظ تمایل سیستم به کاهش انرژی آزاد (ΔG_0) از طریق کاهش انرژی سطحی می باشد. طوری که کل انرژی آزاد یک کریستال برابر با G و G_0 عبارت از انرژی آزاد سیستم و Δg_s انرژی آزاد اضافی حاصل از سطح یا انرژی آزاد سطحی یک دانه می باشد. توجه کنید که انرژی سطحی یک دانه معادل $\frac{2g}{r}$ می باشد که تمایل چند دانه جهت پیوستن به همدیگر را بیشتر می کند یعنی

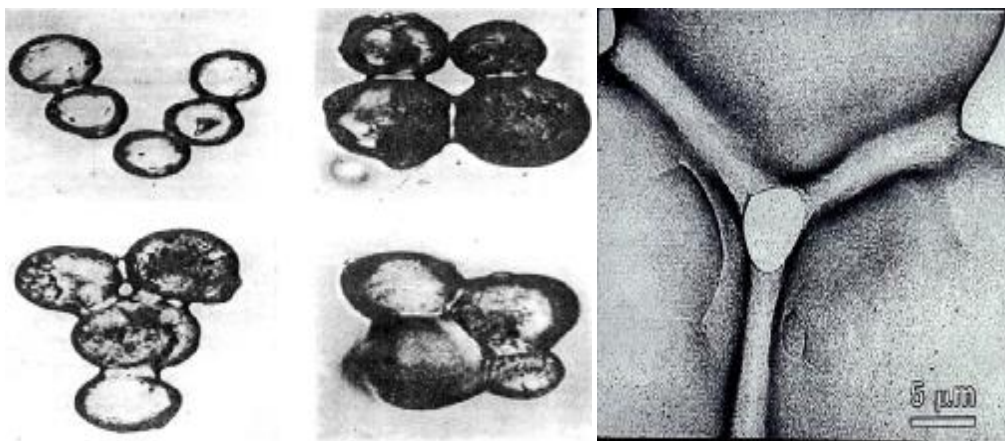
$$G = G_0 + \Delta g_s \quad \text{نیروی محرکه واکنش بین دانه ها می باشد.} \quad \frac{2g}{r}$$

با توجه به شکل 2 سه مدل برای انجام این واکنش ها در پخت سرامیک ها داریم. در حالت (1) جامد دو جزیی مثلاً فلدسپار با کائولن، در اثر حرارت بالای 1150 درجه چون مقدار قابل توجهی مذاب از ذوب فلدسپار بوجود می آید با واکنشی از نوع فیزیکی و یا/ فیزیکی شیمیایی به هم می پیوندند. در حالت (2) جامد به خاطر تمایل ترمودینامیکی در اثر حرارت و ایجاد تحرک کافی در مرز دانه ها و سطوح، با واکنش فیزیکی به یک جامد پلی کریستال یکپارچه تبدیل می شود. مانند اثر حرارت بر پودر Al_2O_3 در دمای 1650 درجه به بالا. در حالت (3) قطعه دو جزیی شامل مقدار بسیار کمی فلدسپار با کائولن حرارت داده شده که فلدسپار تبدیل به مذاب جزیی شده و با افزایش دما (1350 درجه) که همراه با کاهش ویسکوزیته مذاب است و مذاب می تواند سطح دانه های را تر کند، دانه ها را فقط در بعضی نقاط به هم می چسباند.



شکل 2- مدل چگونگی استحاله سرامیکی

با توجه به شکل 3 اگر به پودری مانند آلومینا حرارت دهیم در دمای تقریباً $1600^{\circ}C$ ابتدا دانه ها به یکدیگر چسبیده و سپس به همدیگر نزدیک تر شده و حفره ای را بین خود بوجود می آورند که این حفره آرام آرام کوچک تر شده و در نهایت ممکن است محو شود.



شکل 3- تغییرات پودرهای سرامیکی هنگام فرآیند حرارت دهی

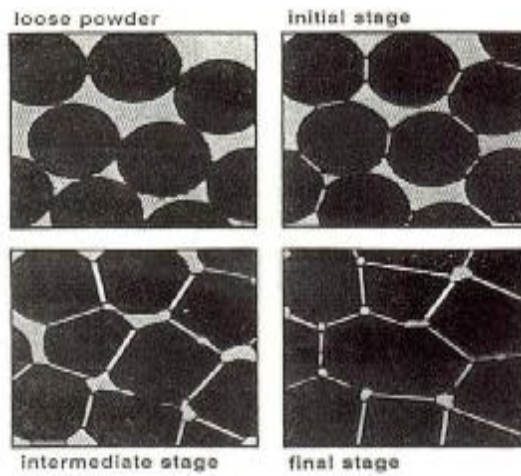
2- مراحل زینترینگ

2-1- گام اولیه یا مرحله نخست زینترینگ

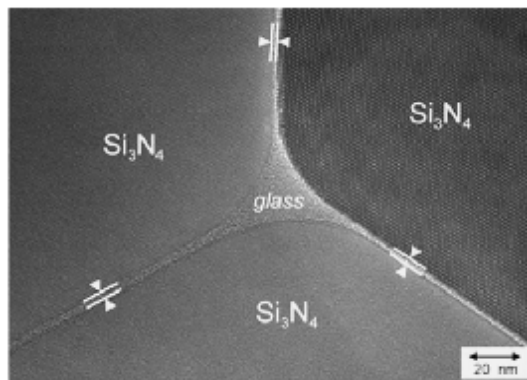
این مرحله با سوختن مواد آلی و اکسیداسیون آنها شروع و با صاف شدن سطوح و احتمال جوانه زنی مذاب یا تشکیل نطفه های دیفوزیونی و سپس تماس نقطه ای بین دانه های پودر منجر به رشد گلوگاه هایی می شود که در نقطه سه گانه دارای بالاترین سرعت استحاله است. و در ادامه با گرد شدن تخلخل های بین دانه ای و تشکیل تخلخل های باز همراه با فعال شدن بیشتر فرآیند هایی مانند دیفوزیونی تکمیل می شود شکل 4.

2-2- مرحله میانی یا مرحله دوم زینترینگ

در این مرحله با انقباض و کوچک شدن تخلخل ها، همراه با کاهش اندازه متوسط تخلخل و رشد آرام دانه ها است. این مرحله از نظر ویژگی های ظاهری قطعه از بیشترین اهمیت برخوردار بوده و مشخصه اصلی آن انقباض همراه با رشد دانه ها است شکل 4.



شکل 4- مراحل مرحله به مرحله زینترینگ



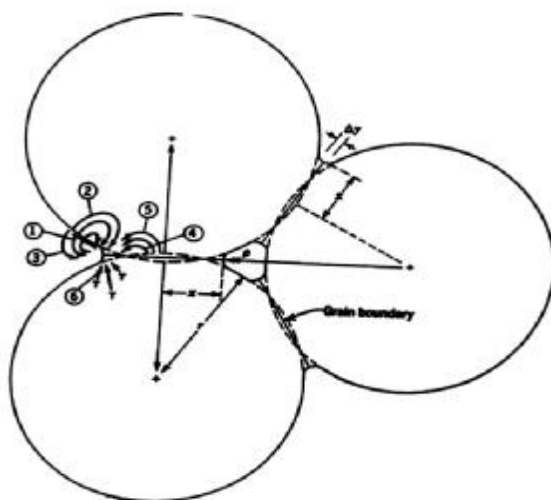
شکل 5- ریزساختار Si_3N_4 با میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا نشانگر مرز دانه سه تایی و فاز شیشه

2-3- مرحله پایانی یا مرحله سوم زینترینگ

مرحله پایانی زینترینگ فرایندی کند است که در آن تخلخل کروی مجزا از هم با مکانیزم نفوذ حجمی متقبض می گردند. پس از گسسته شدن پیوند بین تخلخل و مرز دانه، لازمست تخلخل آزاد شده جاهای خالی را به سمت مرزدانه های اطراف هدایت نماید تا انقباض ادامه یابد. همچنین در اثر طولانی شدن دوره گرمایش، بادرشت شدن تخلخل، اندازه میانگین آنها افزایش یافته ولی از تعداد آنها کاسته می شود. نیروی محرکه ناشی از تفاوت بین انحنا تخلخل کوچک تر نسبت به تخلخل بزرگ تر، منجر به رشد تخلخل بزرگتر در قبال از بین رفتن تخلخل کوچکتر است. فشردن پودر باعث کاهش تخلخل و افزایش نابجایی در پودر است شکل 5.

3- مکانیزم های انتقال جرم در زینترینگ

1- دیفوزیون سطحی 2- تبخیر، چگالش 3- دیفوزیون حجمی 4- ویسکوزفلو 5- پلاستیک فلو 6- انحلال، رسوب

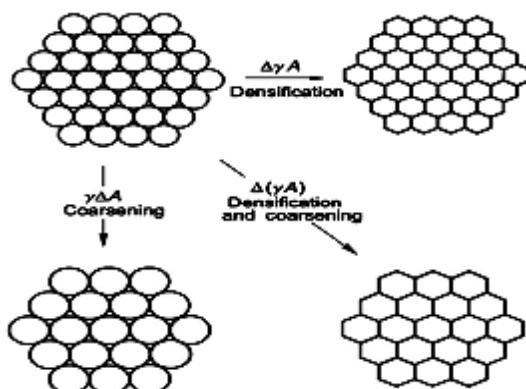


شکل 6- مسیرهای های انتقال جرم و تغییرات در دانسیته

جدول 1- مسیرهای انتقال جرم و تغییرات دانسیته

شماره مکانیزم	مسیر انتقال	مبدا حرکت ماده	مقصد نهایی ماده	تغییر دانسیته
1	دیفوزیون سطحی	سطح	گردنه	خیر
2	دیفوزیون شبکه	سطح	گردنه	خیر
3	انتقال از فاز بخار	سطح	گردنه	بلی
4	دیفوزیون مرزی	مرز دانه	گردنه	بلی
5	دیفوزیون شبکه	مرز دانه	گردنه	بلی
6	دیفوزیون شبکه	نابجایی ها	گردنه	خیر

سه تا از فرآیندهای فوق یعنی 1 و 2 و 6 باعث رشد گردنه هنگام زینترینگ می شوند بدون آنکه مراکز پودرها به همدیگر نزدیک شوند. در صورتیکه سه فرآیند باقیمانده باعث افزایش ناحیه اتصال همراه با نزدیک شدن خودبخودی مراکز و گام اولیه برای متراکم شدن می باشند. در حقیقت بعضی از مکانیزم ها بدون آن که کمکی به تراکم کنند منجر به هدر رفتن نیروهای محرکه زینترینگ می شوند که این مکانیزم ها به نام مکانیزم اتلاف انرژی *coarsening* معروفند شکل 7. هر کدام از این مکانیزم ها در مواد مختلفی قابلیت فعالیت دارند. مکانیزم های غالب انتقال جرم در گرانول ها به جهت وجود عیوب در ساختار، دیفیوژن حجمی است.



شکل 7- تراکم پذیری و یا / عدم تراکم (نیروی محرکه زینترینگ با کاهش انرژی سطحی پیش می رود)

4- انواع زینترینگ

با توجه به دمای زینترینگ و نوع ترکیب بدنه که آیا هنگام زینترینگ مذابی وجود داشته باشد یا نه، فرآیندهای زینترینگ را می توان به سه گروه تقسیم بندی کرد:

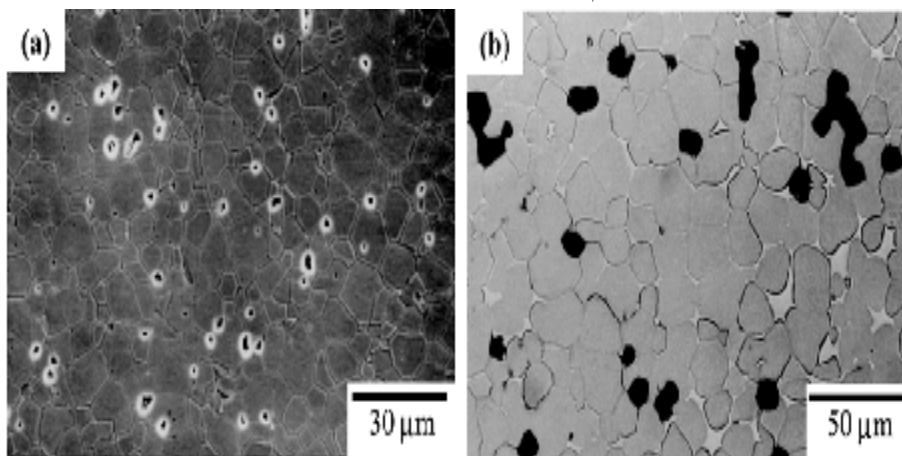
1- زینترینگ جامد به جامد 2- زینترینگ در حضور فاز مذاب 3- زینترینگ با ویسکوزفلو

1-1- زینترینگ در حالت جامد (Solid Sintering)

زینترینگ در حالت جامد از اتصال بین ذرات یک جامد در درجه حرارتی کمتر از نقطه ذوب ($0.8-0.9T_m$) در حالتی که سیستم به طور کلی فاقد فاز مذاب است، بوجود می آید که در نتیجه آن یک جسم یکپارچه و متراکم به وجود می آید. در این واکنش کم شدن مساحت و کاهش انرژی سطحی، نیروی محرکه ای را بوجود می آورند که باعث تراکم فرآورده ها می شود. سرعت زینترینگ بستگی بسیار زیادی به درجه حرارت، ابعاد ذرات، خلل و فرج و نیز به شکل آنها بستگی دارد. لذا برای سرامیکی با خلوص بالا و برای سازه های سرامیکی این متد عالی ترین خواص را بهمراه دارد. در زینترینگ حالت جامد، برای تامین تحرک لازم در مواد سرامیکی لازم است فرآیندهای دیفیوژنی فعال شوند، لذا زینتر جامدات خالص در دمای پایین تر از نقطه ذوب آن ها و در حدود 80-90 درصد دمای ذوب اتفاق می افتد. افزایش دما باعث تحرک اتمی بیشتر در اتم های موجود در ساختار شده و با افزایش تحرک اتمی، جای خالی اتمی که عامل افزایش دیفیوژن است، بیشتر می شود.

2-4- زینترینگ در حضور فاز مایع (Liquid Phase Sintering)

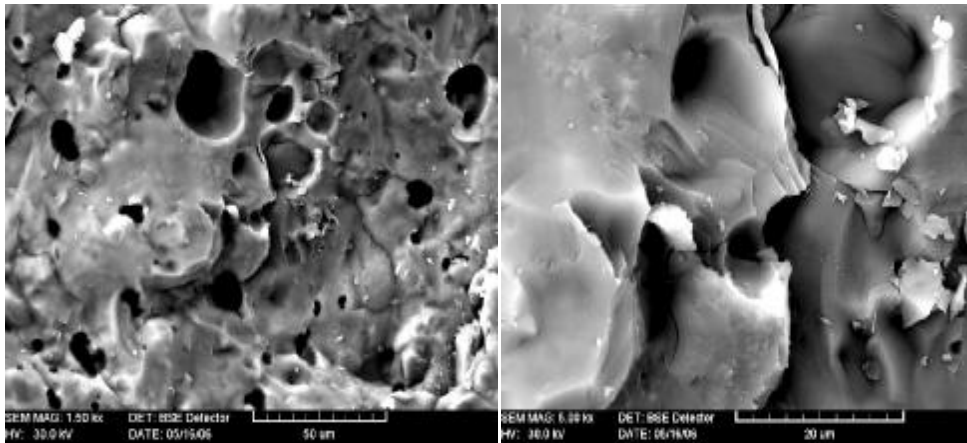
زینترینگ در حضور فاز مذاب زمانی اتفاق می افتد که هنگام زینترینگ مقدار کمی فاز مذاب (کمتر از 15%) وجود داشته باشد. در این مدل ترکیب پودر اولیه و دما طوری انتخاب می شود تا مقدار کمی فاز مایع تشکیل شود، مشروط بر اینکه تمام سطح فاز جامد را تر *Wet* نکرده و آنقدر کم باشد که به داخل تخلخل ها کشیده نشوند. چون مقدار مایع برای پر کردن خلل و فرج کافی نیست در نتیجه برای رسیدن به تراکم بالا و چگالی تئوریک باید تغییراتی در شکل ذرات به وجود آید. در این حالت مذاب بعنوان حرکت دهنده (*rearrange*) جزئی در آرایش پودرها عمل می کند. به این صورت که ذرات جامد در فاز مایع حل شده تا فاز مایع مسیری را برای حرکت اتم ها به وجود آورد و سپس جامد دوباره رسوب کرده تا باعث افزایش ابعاد و تراکم شود. در شکل 8 ریزساختار پودر آلومینایی که در دو حالت زینتر شده اند، قابل مقایسه است. زینترینگ در حضور فاز مذاب باعث می شود تا محصولاتی با تخلخل کم و چگالی بالا با عملکرد فنی خوب تولید شوند.



شکل 8- ریزساختار آلومینا *a*- زینترینگ حالت جامد *b*- زینترینگ با فاز مذاب

3-4- زینترینگ با ویسکوزفلو (viscoseflow sintering)

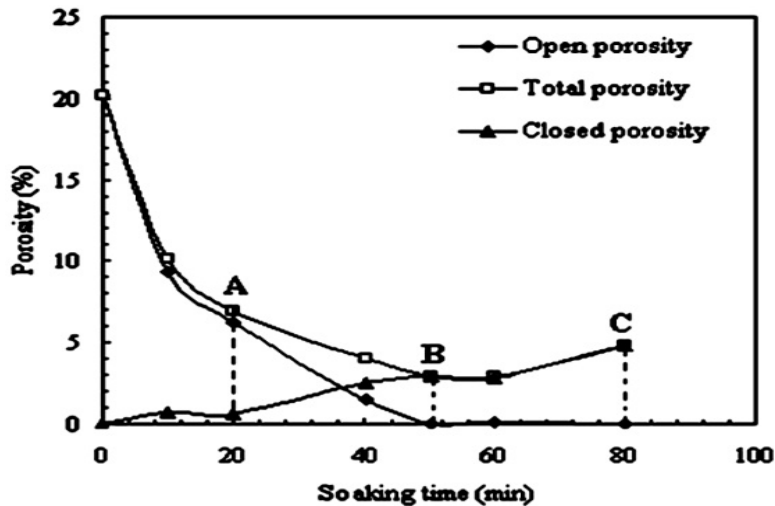
زینترینگ ویسکوزفلو زمانی رخ می دهد که درصد حجمی مذاب به اندازه کافی زیاد باشد، به طوری که بدون آنکه تغییر شکلی در دانه بوجود آید، افزایش دانسیته با جریانی از مذاب چسبناک به همراه دانه ها به وجود می آید. برای سرامیک های مهندسی این مکانیزم کمترین ایمنی را در طراحی سازه های مهندسی خواهد داشت. زیرا در حدود 30 درصد فاز مذاب در ساختار داریم که تبدیل به شیشه یا بلور می شود. گرچه مکانیزم مایع ویسکوز به سبب ارجح بودن آن در سرامیک های سنتی بیشتر مورد توجه می باشد. در زینترینگ با ویسکوزفلو، چون مقدار مذاب قابل توجهی وجود دارد، نتیجه پخت باعث شیشه ای شدن (*vitrification*) ریزساختار است. زجاجی شدن، به نوع تراکمی گفته می شود که در آن مقادیر زیادی مذاب در سیستم به وجود آید طوری که قادر است خلل و فرج بین ذرات را پر کند تا بین آنها پیوندی به وجود آید شکل 9.



شکل 9- سطح مقطع شکست بدنه با زینترینگ ویسکوزفلو

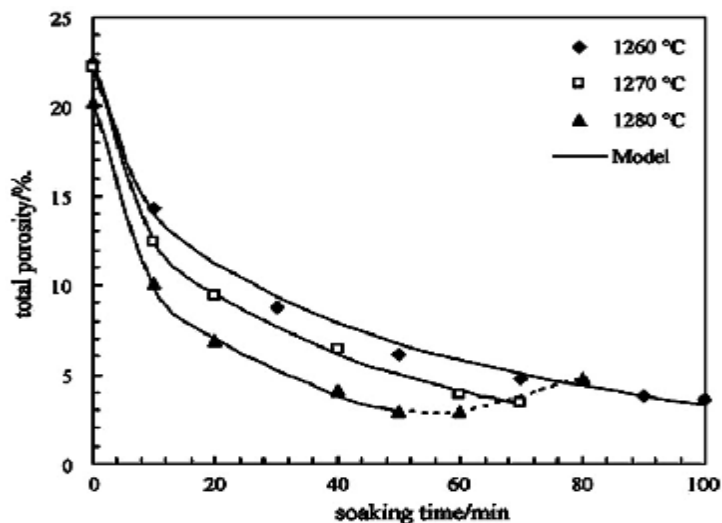
1-3-4- رابطه زمان ماندگاری با تخلخل در ویسکوزفلو

نوع تخلخل ها در مواد متراکم، به تخلخل باز و بسته تقسیم بندی می شوند. تخلخل باز، حفره یا کانالی است که به سطح بدنه راه دارد ولی تخلخل بسته تخلخلی است که به سطح بدنه راه ندارد شکل 10.



شکل 10- رابطه تخلخل های باز، تخلخل بسته و تخلخل های کل با زمان ماندگاری

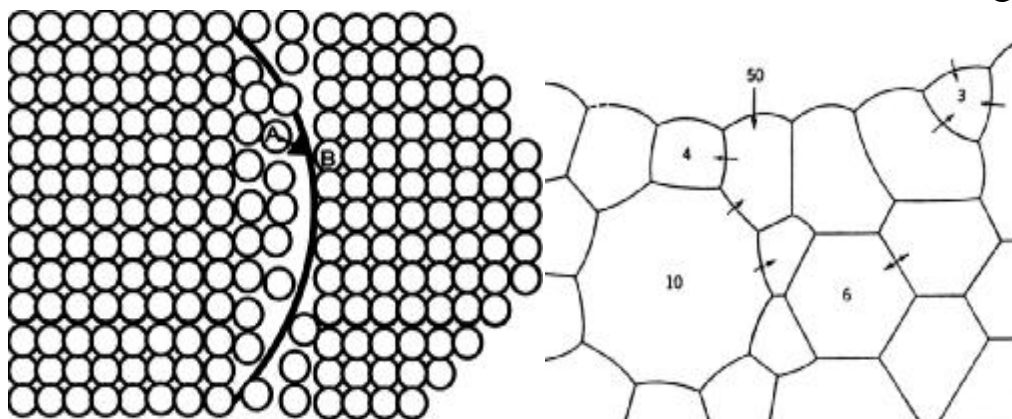
در مقیاس تجربی فرایند تراکم پذیری بدنه پرس شده معمولا در دمای ثابت انجام شده و تخلخل کل به عنوان تابعی از زمان ماندگاری است. تخلخل کلی در قطعه با زمان ماندگاری در شکل 11 نشان داده شده است. به طور کلی این رفتار در زینترینگ در حضور فاز مذاب مشاهده می شود. مشاهده رفتار نمایی به دیفوزیون فاز مذابی که در دماهای بالا تشکیل می گردد، بستگی دارد. با افزایش زمان ماندگاری تخلخل کل کاهش می یابد ولی انتظار می رود این پدیده برای دما و زمان ماندگاری (تا حدی که بدنه بیش پخت نشود)، موثر بوده زیرا در اثر انبساط هوای محبوس در تخلخل های مسدود شده، حجم تخلخل کل مجدداً افزایش می یابد شکل 11.



شکل 11- تغییرات تخلخل کل نسبت به زمان ماندگاری برای ترکیب بدنه پرسلانی

5- رشد افراطی دانه ها (abnormal grain growth)

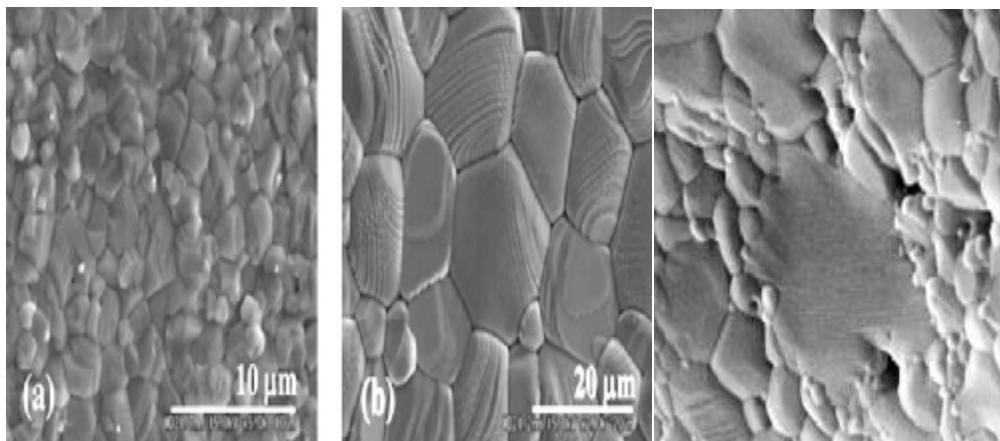
اتم های موجود در مرز دانه ها نسبت به داخل دانه ها دارای بی نظمی بیشتری هستند و چون مرز دانه دارای یک چنین بی نظمی است، به این نواحی با ماهیت آمورف گویند. رشد دانه ها در اثر تمایل سیستم به کاهش مرز بین دانه ها انجام می شود و باعث کاهش کل انرژی سطحی سیستم خواهد شد. اگر در نقطه تماس بین دانه ها، تمامی مرزها از نظر انرژی برابر باشند آنگاه زاویه تماس تعادلی بین دانه ها 120 درجه می شود اما تعداد اضلاع دانه های مختلف با یکدیگر متفاوت است. لذا بسیاری از مرزها دارای انحنا هستند شکل 12



شکل 12- شماتیک ریز ساختار تعداد اضلاع و مهاجرت اتم ها برای تعادل به سمت بیرون انحنا

اگر دانه ای دارای 6 ضلع باشد مرز بین سطوح دانه ای 120° است که از لحاظ ترمودینامیکی وضعیت پایدار دارد. ولی اگر اضلاع دانه ها 6 ضلع نباشد سطوح دانه ها دچار انحنا می شوند، بنابراین دانه ها دارای سطوحی نیمه پایدار بوده و همواره در جهت پایداری سطوح حرکت می کنند. یعنی فقط دانه هایی دارای مرزهای

مستقیم هستند که شش ضلعی باشند. سطوحی که کمتر از 6 ضلع داشته باشند، مرزهای محدب و سطوح با بیش از 6 ضلع دارای مرزهای مقعر خواهند بود. در اثر اختلاف انرژی آزاد در دو سوی منحنی، مرزها همواره سعی دارند تا بسمت مرکز انحنا خود حرکت کنند. لذا دانه هایی که تعداد اضلاع آن ها بیش از 6 باشد به حرکت خود ادامه می دهند و این حرکت بطور افراطی انجام خواهد شد، مگر آنکه توسط عاملی که انرژی لازم برای پیش بردن مرز را افزایش دهند (فشار بالا، دمای پایین، تخلخل یا ناخالصی) متوقف شود شکل 13 .



شکل 13- رشد افراطی دانه ها

جدول 2- وابستگی مکانیزم حرکت اتمی در رشد افراطی به اندازه دانه

اندازه دانه	نوع مکانیزم
d	ویسکوزفلو
d^2	تبخیر- رسوب
d^3	دیفوزیون شبکه
d^3	انحلال - رسوب
d^4	دیفوزیون سطحی
d^4	دیفوزیون مرز دانه ای

6- زینترینگ تحت فشار

زینترینگی که هنگام پیشرفت آن فشار خارجی اعمال شود زینترینگ تحت فشار (*Hot Press sintering*) گویند. اعمال فشار هنگام زینترینگ پودرهای سرامیکی باعث افزایش نیروی محرکه میکروسکوپی می شود. اما رسیدن به چگالی های تئوریک، فرآیندی پر هزینه و گران قیمت می باشد. در زینترینگ بدنه های سرامیکی وقتی که با تغییر در دانه بندی و توزیع دانه بندی همراه با کنترل دما و ترکیب نتوانیم به چگالی تئوریک 100 درصد برسیم، فشار خارجی اعمال شده را بعنوان یکی از فاکتورهای مؤثر جهت رسیدن به حداکثر دانسیته می دانیم.

معادله (2) چگونگی تاثیر اعمال فشار در فرآیند پخت را نشان می دهد. امکان حرکت اتم ها با دیفوزیون اتمی یا ویسکوزفلو در پیوستن آنها از سطوح انحنا دار به سطوح مسطح با اعمال فشار به این صورت است:

$$\Delta p' = \frac{a \cdot g}{r} + K \cdot p_a \quad (2)$$

K ضریب تبدیل فشار خارجی اعمال شده بعنوان تنش واقعی در مرز دانه و P_a فشار خارجی و $\Delta P'$ نیروی کششی سطح انحنا دار است که با اعمال نیروی خارجی بیشتر می شود. مثلاً " اگر برای بریلیم اکسید فشار اعمال شده در پرس گرم برابر 20 مگا پاسکال باشد و اگر نیروی کشش سطحی (g_p) برای حفره ای به قطر 0/5 میکرومتر معادل $1/74 J/m^2$ باشد در دمای 1400 درجه مقدار K برابر 3/48 مگا پاسکال می شود. بنابراین نیروی محرکه در همان درجه حرارت، برای فرآیند زینترینگ حدود 5 تا 10 برابر افزایش خواهد یافت جدول 3.

جدول 3- اطلاعاتی در مورد سرامیک های پیشرفته

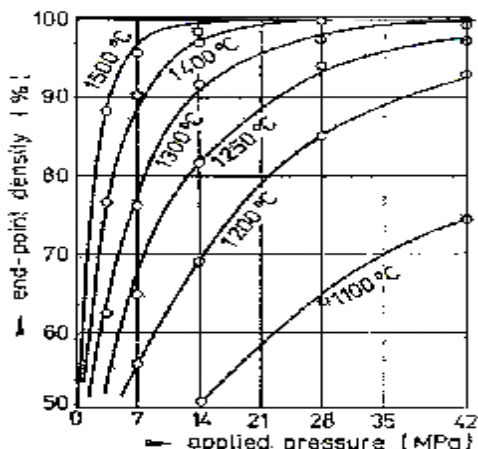
سرامیک	T_m	T_b	صفحه	$J/m^2 - g_p$
<i>MgO</i>	75.3	3600	001	2,6-0,48*10,3
<i>CaO</i>	2860	3800	001	2,2-0,38*10,3
<i>BaO</i>	2820	4390	001	2,44-0,47*10,3
<i>Al₂O₃</i>	2300	3700	1034	1,2-0,23*10,3
<i>b - SiC</i>	3000	-	110	3-0,55*10,3

یکی از برتری های پرس گرم این است که قطعات شکل داده شده از این روش دارای دانسیته بالاتر و بعضاً در حد تئوریک بوده در حالیکه دانه بندی در ریز ساختار آن ها نیز بسیار ریز دانه می باشد که این نیز باعث چقرمگی و افزایش فوق العاده در استحکام مکانیکی قطعات می شود. روش شکل دهی با پرس گرم ایزواستاتیک باعث کاهش اندازه تخلخل های بسته در مرحله نهایی زینترینگ می شود. زینترینگ بدون فشار در حالت جامد بدون حضور فاز مایع، براساس مکانیزم دیفوزیونی استوار می باشد. در حالت زینترینگ تحت فشار گرم، حضور فشار بیرونی باعث افزایش تنش تسلیم همراه با تغییر فرم پلاستیک در ذرات می شود. با اعمال فشار، علاوه بر مکانیزم های زیر که باعث افزایش دانسیته است، مکانیزم جدیدی بنام "خزش دیفوزیونی" را موجب می شود.

-شکست های دانه ای (*Fragmentation*) - پلاستیک فلو (*Plasticflow*) - آرایش مجدد دانه ها - شکست دانه های بزرگتر (*breaking down*)

اگرچه دیفوزیون به عنوان مکانیزم تعیین کننده بیشترین نقش را دارد ولی تغییر شکل پلاستیک، ویسکوزفلو، جهت گیری ترجیحی ذرات، تنش های حاصله از ترک و عوامل دیگری نیز وجود دارند. می دانیم در حالت پرس گرم دمای زینترینگ در حدود نصف نقطه ذوب ($0.5T_m$) (اگرچه هیچ گونه افزودنی اضافه نکنیم) است.

به علاوه مثل Si_3N_4 و SiC هرچه ترکیبات خواص کوالانسی بالاتری دارند، دمای بالاتری را نیاز داریم.



شکل 14- اثر فشار- دما روی دانسیته نهائی قطعه آلومینائی

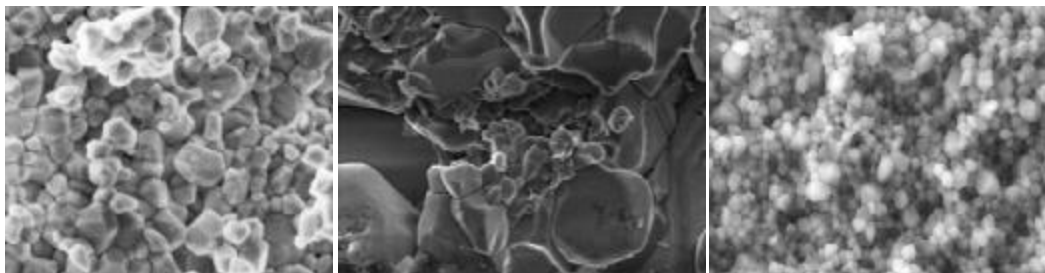
1-6- پارامترهای موثر در پرس گرم

پارامترهای اولیه جهت انجام پرس گرم عبارتند از:

1- دما 2- فشار 3- زمان 4- افزودنی ها

1-1-6- اثر فشار و زمان بر ریز ساختار بدنه های آلومینائی

ریزساختار نمونه هایی از پودر $\gamma-Al_2O_3$ زینتر شده در $1000^\circ C$ و فشار 5 و 7 گیگاپاسکال به مدت 15 دقیقه مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه دانه برای نمونه زینتر شده در $1000^\circ C$ در 7 گیگاپاسکال ریزتر از نمونه زینتر شده در فشارهای پایین تر (5 گیگاپاسکال) در همان دما و زمان است.



شکل 15- تصویر SEM از سطح مقطع نمونه زینتر شده در $1000^\circ C$ و 15 دقیقه - 7 گیگاپاسکال - 5 گیگاپاسکال
پ- 5 گیگاپاسکال به مدت 1 دقیقه

7- اثر حرارت بر مواد اولیه

با حرارت دادن به قطعات سرامیکی، استحاله ها و واکنش های فیزیکی و شیمیائی متفاوتی اتفاق می افتد که به این شرح مورد بررسی قرار می گیرند:

- در دمای تا 100 درجه سانتی گراد، آب پلاستیسیته تبخیر می شود.

- در دمای تا 450 درجه سانتی گراد، آب پیوندی یا ترکیب شیمیایی از کائولینیت شروع به تجزیه می کند. انواع دیگر رسی ها آب شیمیایی یا آب ترکیب را بین 450 تا 700 درجه سانتی گراد از دست می دهند. در این حالت همراه با مقدار کمی انقباض، تخلخل افزایش می یابد.

- در دمای تا 500 درجه سانتی گراد، هیدروکربن موجود در مواد آلی شروع به سوختن می کنند، در این حالت مسیرهای خروج آنها سیاه می شود.

- در دمای 573 درجه سانتی گراد، استحاله کوآرتز اتفاق افتاده که همراه با تغییر ساختار همراه با 2 درصد تغییر حجم می باشد.

- در دمای 600 تا 800 درجه سانتی گراد، الف- نمک های محلول که در سطح و داخل ذرات رسوب کرده اند، ذوب شده و لایه ای به صورت فیلم مایع، ذرات رسی و دیگر مواد دیرذوب را به هم می چسباند.

ب- دیفوزیون سطحی و جابجایی با بخار در ترکیبات رسی آغاز می شود که موجب تشکیل گلویی در ساختار است. ناخالصی های محلول در طول خشک شدن در نقاط تماس ذرات متمرکز می شوند که در طول فرآیند پخت، این نقاط تماس در 600-800 درجه سلسیوس به مایع تبدیل می شوند. فشار موینگی ذرات را به هم می فشارد. نتیجه این فعل و انفعال باعث انقباض کمی در قطعه است مثلاً" در بدنه ارتن ورمیزان حجمی تخلخل از 30-75٪ اولیه به 15-30 درصد باقی می ماند. تغییرات در ساختار یک ارتن و حاوی آهن در 700 درجه سانتی گراد با توجه به تولید فاز مذاب در ساختار باعث کاهش شدید در جذب آب است.

- در 800 درجه سانتی گراد واکنش بین فازهای چندتایی یوتکتیکی یا پریکتوئیدی مخلوطی از ذرات بلوری در یک ماتریس شیشه ای را بوجود آورده که باعث اتصال قوی و سخت تر در ظروف با جذب آب کمتر است.

- در دمای 800-900 درجه سانتی گراد، کمک ذوب مانند K_2CO_3 و Na_2CO_3 با خاک رس واکنش می کند. پتاسیم کربنات یا سدیم کربنات به شکل یک مایع سیلیکاتی ویسکوز در حد فاصل ذرات تشکیل می گردد.

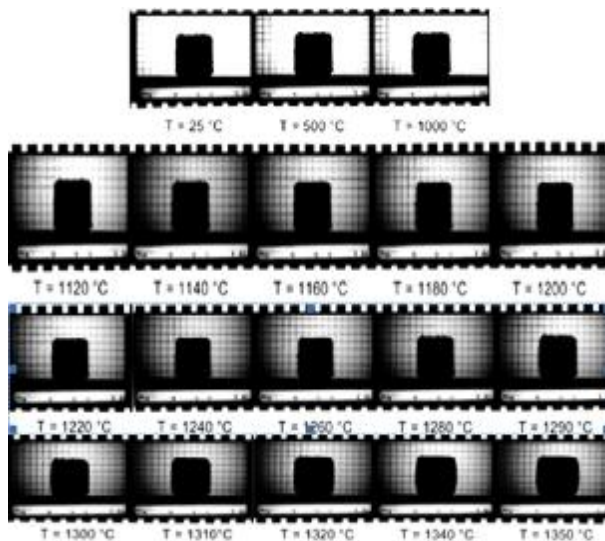
- در دمای 870 درجه سانتی گراد سنگ آهک به صورت $CaO + CO_2 = CaCO_3$ تجزیه می شود.

- در 900 درجه سانتی گراد محصول که به طور کامل متشکل از یک مایع ویسکوز است به سختی شکل خود را حفظ می کند. دامنه حرارتی 800-900 درجه سانتیگراد محدوده بسیار حیاتی است. $CaCO_3$ موجود در دمای 800 سانتیگراد تجزیه شده، اما CaO حاصل تا زمانی که درجه حرارت بالاتر نباشد، واکنشی نشان نمی دهد. مواد رسی و کمک ذوب با هم واکنش نشان می دهند که به شکل مواد کریستالی و مایع سیلیکاتی ویسکوز، از بدنه برای پخت موفقیت آمیز بیش از یک طیف گسترده ای از زمان و درجه حرارت فرموله شده است. این اجسام دارای دانه های دیرگداز پراکنده در یک مایع ویسکوز سیلیکاتی حاوی یک شبکه گسترده ای از کریستال های ریزدانه که موجب سفت شدن مایع و از دفورمگی جلوگیری می کند.

- در دمای 900 درجه سانتی گراد، الف- دیفوزیون حجمی رخ می دهد که باعث تشکیل بیشتر گلویی، انقباض و

تراکم و چگال تر شدن می شود. ب- ساختار بلوری اکثر مواد رسی تخریب شده، که در نتیجه آن محصولات در دمای بالا دچار دگرگونی شدیدی می شوند و انقباض قابل توجهی می کنند.

- در دمای 1050 تا 1200 درجه سانتی گراد، فلدسپار شروع به ذوب شدن کرده که باعث انحلال سیلیس و برخی از مواد در فاز مذاب حاصل می گردد. ایجاد فاز شیشه در سرامیک ها موجب تشکیل خلل و فرج بسته و کاهش سریع در تخلخل می شود.



شکل 16- تصاویر HSM از ترکیب بدنه پرسیلانی استون و

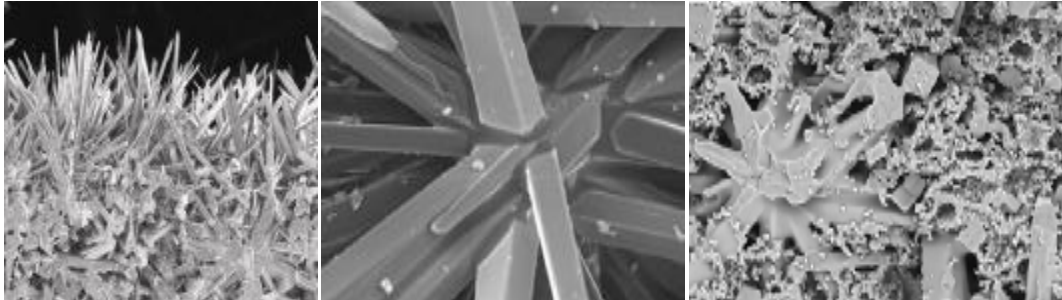
جدول 3- آنالیز مینرالی بدنه سه جزیی با پخت در دمای متفاوت و زمان 3 ساعت ماندگاری در حداکثر دما

فاز	دما (°C)
آلفا کوارتز، کائولینیت، میکروکلین، نفلین	خام
آلفا کوارتز، میکروکلین، نفلین	600
آلفا کوارتز، میکروکلین، نفلین، سانیدین	700
آلفا کوارتز، میکروکلین، نفلین، سانیدین	800
آلفا کوارتز، میکروکلین، نفلین، سانیدین	900
آلفا کوارتز، میکروکلین، نفلین	1000
آلفا کوارتز، میکروکلین، نفلین، مولایت، شیشه	1100
آلفا کوارتز، مولایت، شیشه	1200
آلفا کوارتز، مولایت، شیشه	1400
آلفا کوارتز، مولایت، کریستوبالیت، شیشه	1500

8-تشکیل مولایت

گونه های مولایتی که در بدنه های چینی بوجود می آیند، عبارتند از:

- 1- مولایت اولیه که از تجزیه رسی خالص بوجود می آید.
- 2- مولایت ثانوی که از واکنش بین فلدسپات با رسی یا از واکنش بین فلدسپات-رسی-سیلیس بوجود می آید.
- 3- مولایت ثالثیه که از مذاب غنی از آلومین مانند پودر آلومینا افزودنی رشد و کریستالیزه می کند .



شکل 16- تشکیل فاز مولایت براساس قوانین ترمودینامیک و ایجاد ریزساختار گوناگون

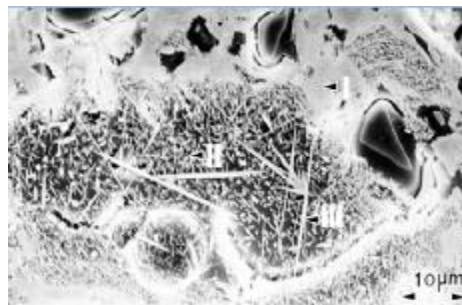
الف- در فاز جامد ب- در فاز مذاب پ- از فاز بخار

8-1-مولایت اولیه (تیپ I)

مولایت اولیه، مولایت بلوری در قالب خوشه ای یا مولایت همبافته است، از تجزیه کائولن در دمای 900 درجه تشکیل می شود. نسبت تشکیل مولایت تیپ I با افزایش دما کاهش یافته و به طور همزمان، اندازه بلورها نیز با افزایش دما افزایش می یابد بطوری که در دمای $1400^{\circ}C$ به حداکثر نسبت خود یعنی نسبت (3:1) می رسد.

8-2-مولایت ثانویه (تیپ II)

مولایت سوزنی شکل بلند به عنوان مولایت ثانویه معروف است. در این حالت مولایت اولیه به عنوان جوانه عمل کرده و همزمان دیفوزیون قلیایی های جدا شده از مذاب آلومینوسیلیکاتی اتفاق افتاده و مولایت منشوری شکل در فلدسپار باقی مانده رشد می کند. زیرا حضور ناخالصی ها باعث رشد آرامتر مولایت در این حالت است شکل 17.



شکل 17- سه گونه فاز مولایت در یک نوع بدنه پرسیلانی