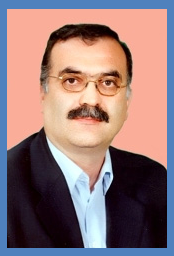
بررسی تحولات اخیر کاربرد نشاسته در فرآیند ساخت سرامیک‌های پیشرفته

فریبا حمیدی، حسین سرپولکی*

دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده: نشاسته یک ماده آلی با خواص خوب و قیمت پایین قابلیت کاربرد بعنوان چسب در ساخت قطعات سرامیکی دارد. از این ماده می‌توان برای ساخت قطعات متخلخل به دلیل سوختن در دمای بالا و به جا گذاشتن تخلخل استفاده کرد. همچنین امروزه برای کاهش هزینه‌های مربوط به تراشکاری، ترجیح داده می‌شود قطعات در حالت خام تراشکاری شوند که نشاسته می‌تواند نقش بسزایی در این فرآیند ایفا کند در این مقاله به معرفی نشاسته، ساختار و خواص آن پرداخته شده و سپس به نقش نشاسته در روش‌های مختلف شکل‌دهی قطعات سرامیکی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: نشاسته، شکل‌دهی، تراشکاری، تخلخل‌زا، چسب.



دکتر حسین سرپولکی، نویسنده‌ی مسئول مقاله، عضو هیات علمی دانشگاه علم و صنعت ایران

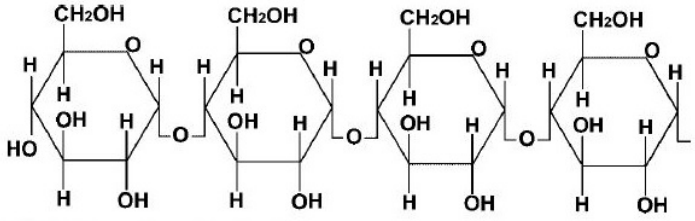
hsarpoolaky@iust.ac.ir

۱- مقدمه

چسب‌های آلی افزودنی‌های مهم برای ساخت سرامیک‌ها هستند که به‌خصوص استحکام مکانیکی و پلاستیسیته برای آن‌ها فراهم می‌کنند. انتظار می‌رود یک چسب خوب برای کاربردهای سرامیکی استحکام خام بالا فراهم کند، این استحکام خام ناشی از اتصال بین ذرات با یک چسب است که بستگی به کیفیت چسب و توزیع آن نیز دارد. استحکام خام قطعات سرامیکی تهیه شده نیز از نقطه نظر جابجایی و ماشین‌کاری اهمیت دارند. برای بدنه‌های ایده‌آل، استحکام خام مستقیما متناسب با قدرت چسبندگی چسب است. چسب‌ها در ساخت سرامیک‌ها در فرآیندهای مختلف مانند، پرس خشک، قالب‌گیری تزریقی، ریخته‌گری نواری، اکستروژن، ریخته‌گری دوغابی استفاده می‌شوند. اخیرا استفاده از نشاسته بدلیل خواص ویژه از جمله خاصیت چسبندگی، دوستدار محیط زیست بودن و ارزن بودن به‌عنوان عامل چسب و استحکام‌دهنده در ساخت قطعات سرامیکی مورد توجه و کاربرد بسیار قرار گرفته است [۱].

۲- نشاسته، ساختار و خواص

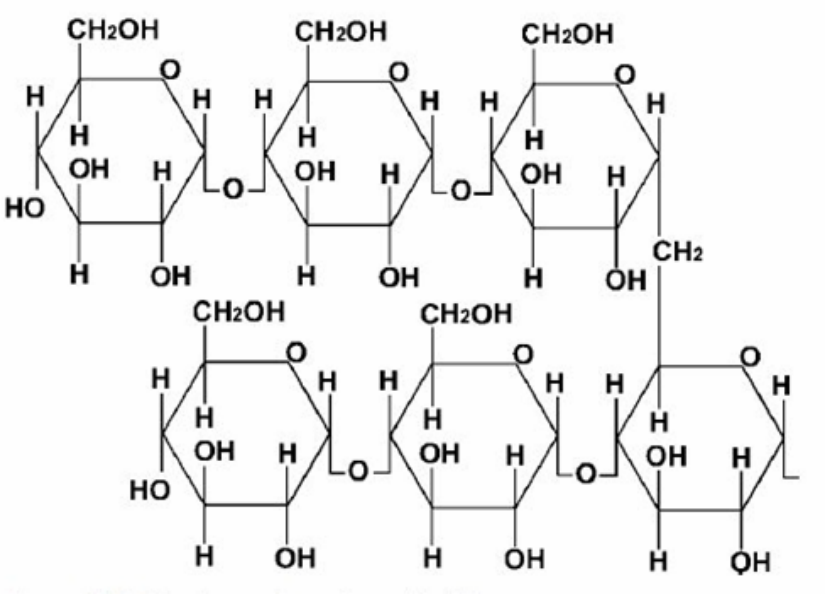
نشاسته یک پلی ساکارید طبیعی مخلوطی از دو پلیمر دی‌گلوکز (یکی به نام آمیلوپکتین که شاخه‌ای است و بلند و دیگری آمیلوز به‌صورت خطی و کوتاه‌تر) است. گرانول‌های نشاسته ساختارها و ویژگی‌های میکروسکوپی، خاص دارند، شکل و اندازه آن براساس ریشه گیاهی آن متفاوت است. قطر گرانول‌ها می‌توانند از زیر ۱μm تا بالای ۱۰۰μm باشد و شکل آن‌ها نیز می‌توانند منظم (کروی، زاویه‌دار، بیضی‌شکل) یا کاملا بی‌شکل و بی‌نظم باشند [۵-۲]. شکل ۱ و ۲ به ترتیب ساختار خطی آمیلوز و ساختار شاخه‌ای آمیلوپکتین را نشان می‌دهند.



شکل ۱- ساختار خطی آمیلوز [۵].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]



شکل ۲- ساختار شاخه‌ای آمیلوپکتین [۵].

آمیلوز و آمیلوپکتین به دلیل تفاوت ساختاری ویژگی‌های متفاوتی دارند. پس از جوشاندن نشاسته آمیلوز قابلیت تشکیل ژل را پیدا می‌کند درحالی‌که به دلیل مولکول‌های بزرگ آملیوپکتین ساختار آن‌ها، امکان تشکیل ژل از آمیلوپکتین وجود ندارد[۵]. از این ویژگی در ساخت قطعات سرامیک بسیار استفاده شده است.

نتایج حاصل از DTA برای شاسته نشان می‌دهد که در محدوده دمایی ۳۶۳-۵۴۳°C دو پیک گرمازا وجود دارد. TG نیز نشان دهنده افت وزن ۵۸ درصدی نشاسته از ۲۶۵°C تا ۳۶۰°C را نشان می‌دهد، درنهایت، افت وزن به آرامی افزایش یافته و در ۶۰۰°C برابر با ۸۰ درصد می‌شود. نشاسته پس از سوختن مقدار خیلی کم ماکزیمم ۰/۵ درصد وزنی خاکستر به جا می‌گذارد[۱].

۳- کاربردهای نشاسته در ساخت قطعات سرامیک

طی سه دهه اخیر نشاسته بعنوان یک عامل تخلخل‌زا و پیرولیز کننده یک عامل محبوب برای ساخت سرامیک‌های مختلخل شده است. یکی از مزایای نشاسته (در مقایسه با سایر عوامل تخلخل‌زای با ریشه زیستی) میزان خاکستر کم است که آلودگی مواد سرامیکی با قلیایی‌ها و اثر یون‌ها را کاهش می‌دهد [۲]. نشاسته در روش‌های مختلف شکل‌دهی قطعات سرامیک‌های پیشرفته اعم از پرس، ریخته‌گری دوغابی، ریخته‌گری نواری، اکستروژن و غیره استفاده شده است [۳-۱، ۲۸-۶]. در ادامه به برخی از سرامیک‌های پیشرفته تهیه شده با استفاده از نشاسته و اهمیت‌های آن پرداخته خواهد شد.

۳-۱- پرس

سنگاوار و همکارانش[1] قطعات پیزوالکتریک را با پرس ترکیبات PZT با چسب‌های مختلف که یکی از آن‌ها نشاسته بود تهیه کردند. بدنه‌های تهیه شده چگالی خام پایین داشتند. استحکام حاصل از بدنه‌های تهیه شده با این روش و با استفاده از نشاسته به‌عنوان چسب ۳۶/۲۱kg/mm^2، اندازه دانه‌ها ۱/۶۲μm و اندازه تخلخل‌ها برابر با ۱/۵۱μm بدست آمد. دمای کیور یا عمل آوری این بدنه تهیه شده که در آن ثابت دی‌الکتریک بیشینه است برابر با ۲۷۷°C و بیشینه ظرفیت آن ۲۶/۲۰nF به‌دست آمد. دمای کیور در واقع دمای کاری قطعات شناخته می‌شود که با این روش دمای کاری نسبتا بالایی به دست آمده است[۱].

نیترید سیلسیم حتی به‌صورت متخلخل، ماده با خواص مکانیکی خوبی است و استحکام و سفتی بالایی دارد. از طرفی نیترید سیلسیم متخلخل نسبت به نوع متراکم آن سبک‌تر است و می‌تواند به آسانی ماشین‌کاری شود. آرانزازو[2] و همکارانش با پرس کردن ترکیبی از Si_3N_4، افزودنی‌های Al_2O_3 و Y_2O_3 و نشاسته بعنوان عامل‌تخلخل‌زا با روش پرس بدنه‌های Si_3N_4 را تهیه کردند [۶].

[1] Sangawar
[2] Aranzazu

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]

۳-۲- ریخته‌گری ژله‌ای

روش ریخته‌گری ژله‌ای یک روش کم‌هزینه برای تولید اشکال پیچیده است. در این روش از عوامل ژل‌شونده استفاده می‌شود این عوامل، به یک سیال افزوده شده سپس پودرهای سرامیکی به آن اضافه می‌شود، پس از افزودن آغازگر و کاتالیزور، که منجر به آغاز واکنش پلیمریزه شدن می‌شود، دوغاب درون قالب با شکل دلخواه ریخته می‌شود. حین واکنش میکروژل‌هایی تشکیل می‌شود که این میکروژل‌ها به یکدیگر متصل شده ماکروژل‌هایی را می‌سازند که ذرات را در جای خود و درکنار هم نگه می‌دارند [۷].

چند سال پیش یک روش شکل‌دهی جدید (ریخته‌گری با سخت کردن نشاسته[1]) پیشنهاد شد که در آن نشاسته در تهیه سرامیک‌ها استفاده شده است. این روش از قابلیت متورم شدن نشاسته در دمای بالا استفاده می‌کند تا بدنه خام سرامیک را از دوغاب سرامیکی بسازند [۴]. زمانی‌که یک دوغاب سرامیکی همراه با نشاسته حرارت داده می‌شود پیوندهای بین‌مولکولی که گرانول‌ها را به‌هم نگه می‌دارد ضعیف می‌شوند. حین این فرآیند گرانول‌ها با جذب آب متحمل تورم سریع و غیرقابل برگشت می‌شوند (فرآیند ژلاتینه شدن). این فرآیند باعث افزایش ویسکوزیته سوسپانسیون، انتقال به رفتار ویسکوالاستیک و تشکیل یک ژل الاستیک بین ۵۵–۸۵°C بسته به نوع نشاسته و سایر پارامترها می‌شود. در این رفتار مقدار آب در دسترس به‌تدریج کاهش می‌یابد و منجر می‌شود ذرات سرامیک به‌هم بچسبند و درنتیجه به‌صورت بدنه جامد محکم شوند. به‌دلیل فرآیند ژلاتینه شدن مولکول‌های آمیلوز، گرانول‌های نشاسته جذب ذرات سرامیکی می‌شوند. این فرآیند عامل اصلی چسبیدن ذرات سرامیکی است و استحکام مکانیکی بدنه خام را بهبود می‌بخشد [۹–۸]. این روش اولین بار توسط لیکدفلت[2] و همکارش در سال ۱۹۹۸ اختراع شد که به نام ریخته‌گری با استفاده از سخت کردن نشاسته نامیده شد [۱۰].

نشاسته همزمان به‌عنوان عامل تخلخل‌زا نیز عمل می‌کنند. درنتیجه، این روش شکل‌دهی برای تهیه سرامیک‌های متخلخل مناسب هستند .این روش با موفقیت برای ساخت سرامیک‌های متخلخل آلومینایی، زیرکونیایی، کامپوزیت‌های زیرکونیا آلومینا، سرامیک‌های کوردیریت، مولایتی، کاشتنی‌های کلسیم کربنات زیست فعال و غیره به کار گرفته شده است [۸، ۴]. مواد سرامیکی متخلخل قابلیت استفاده برای طیف وسیعی از کاربردها مانند پایه کاتالیست‌ها، فیلترها، سنسورهای گازی، کوره‌های احتراقی و عایق‌های حرارتی را دارند [۱۱]. لازم به ذکر است میزان نشاسته مصرفی و مشخصات آن‌ها (مورفولوژی و اندازه گرانول‌ها) و رفتارشان در دوغاب در دمای بالا (ظرفیت متورم شدن، توزیع مورفولوژی و اندازه گرانول‌های متورم شده و درجه تجزیه) ریزساختار متخلخل نهایی را تعیین خواهد کرد [۲، ۸، ۹].

تالو[3] و همکارانش با استفاده از این روش بدنه‌های متخلخل مولایت را با انواع نشاسته با ریشه‌های مختلف تهیه کردند. بدنه‌های مولایت متخلخل ($3Al_2O_3.2SiO_2$) به‌عنوان عایق حرارتی مناسب هستند زیرا هدایت حرارتی کم، ضریب انبساط متوسط، پایداری شیمیایی خوب و خواص مکانیکی دما بالای عالی دارند [۱۲]. آلوس[4] [۱۳] و ساندوال[5] [۸] و همکارانشان نیز از این نوع ریخته‌گری برای ساخت بدنه‌های متخلخل کوردیریت از مواد اولیه شامل کائولن، تالک و آلومینا و همچنین عامل تخلخل‌زای نشاسته استفاده کردند و قطعاتی را تهیه کردند که می‌توانند در حالت خام ماشین‌کاری شود.

بدنه‌های آلومینایی متخلخل نیز با این روش باموفقیت توسط میناتی[6] [۱۴]، گرگوروا[7] [۱۵] زیووکوا[8] [۱۶]، خطاب[9] [۱۷] و همکارانشان تهیه شد. اهمیت بدنه‌های آلومینایی متخلخل در استفاده بعنوان پایه کاتالیست، فیلترها، کاربردهای پزشکی، پایه غشاهای سرامیکی و غیره است [۱۸]. همچنین کامپوزیت‌های متخلخل آلومینا–زیرکونیا نیز توسط پابست[10] و همکارانش با این روش تهیه شده است [۱۹].

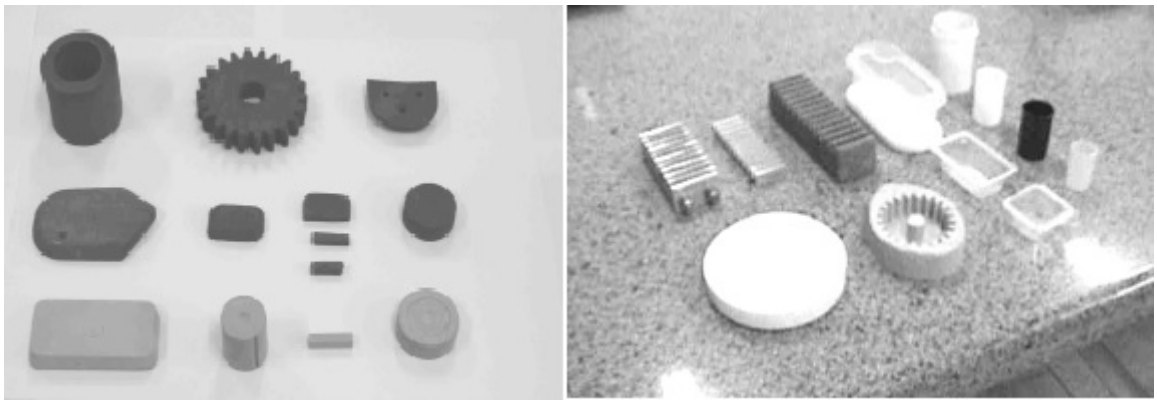
---

[1] Starch Consolidaton Casting
[2] Iyckfelt
[3] Talou
[4] Alves
[5] Sandoval
[6] Minatti
[7] Gregorová
[8] Zivocova
[9] Khattab
[10] Pabst

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]

استفاده از مواد زیرکونیایی (متراکم یا متخلخل) در کاربردهای صنعتی روبه افزایش است. زیرکونیای تثبیت شده متخلخل مواد با خواص مکانیکی بالا با خواص مناسب مانند پایداری حرارتی و مقاومت خوردگی و مقاومت شوک حرارتی فراهم می‌کند. تولید زیرکونیای متخلخل به دلیل کاربردهای صنعتی ازجمله فیلترهای سرامیکی، پایه‌کاتالیست‌ها و غشاها برای فیلتراسیون گازی، سلول‌های سوخت اکسیدی جامد ومواد زیستی توجه زیادی را به خود جذب کرده است [۲۰]. گاریدو[1] و همکاران نیز با استفاده از روش ریخته‌گری با سخت‌کردن نشاسته بدنه‌های $3Y\text{-}ZrO_2$ را با استفاده از پودر ZrO_2 تجاری و نشاسته سیب‌زمینی برای دستیابی به ساختاری متخلخل با اندازه و توزیع تخلخل کنترل شده تهیه کردند [۲۱-۲۰].

سرامیک‌های کاربید سیلسیوم با روش‌های مشابه با به‌کارگیری ویژگی‌های اساسی نشاسته و قابلیت تشکیل ژل در آب تهیه شدند. دوغاب شامل آب مقطر، دفلوکولانت، ماده خشک (شامل ۹۰٪ SiC و ۱۰٪ نشاسته ذرت) را تهیه شده، درون قالب‌های متخلخل ریخته شدند. سپس دوغاب حرارت داده شده تا در دمای ۷۵°C ژل تشکیل شود، پس از خشک کردن مرحله زینتر انجام شد. ابتدا قطعات به مدت یک ساعت برای سوختن نشاسته در دمای ۱۰۰۰°C قرار داده شدند و پس از زینتر در ۲۰۵۰°C به مدت نیم ساعت بدنه‌های متخلخل SiC تهیه شدند [۹]. شکل۳ تصویر قطعات SiC تهیه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف) قالب‌های استفاده شده، (ب) قطعات SiC تهیه شده با روش ریخته‌گری با سخت‌کردن نشاسته[۹].

سرامیک‌های هیدروکسی‌آپاتیت (HA) به طور گسترده برای جایگزینی‌های استخوانی به کار گرفته شده‌اند. HA همراه به بتا تری کلسیم فسفات نزدیک به سه دهه بیشترین جایگزین برای استخوان‌ها بوده‌اند. ترکیب شیمیایی نزدیک به فاز معدنی استخوان علت زیست‌سازگاری عالی آن‌ها با بافت استخوانی است. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به تهیه زیست‌سرامیک‌های HA متخلخل شده است. HA متخلخل اتصال قوی به استخوان را نشان می‌دهد؛ بهم پیوستگی حفرات اجازه رشد بافت استخوانی درون حفرات را می‌دهد و باعث افزایش استحکام کاشتنی HA می‌شود. اندازه و مرفولوژی حفرات عامل‌های حیاتی برای استخوان‌سازی عالی هستند. ساختار متخلخل HA با استفاده از عوامل تخلخل‌زا ایجاد می‌شوند. روش سخت کردن نشاسته یکی از روش‌های ساخت هیدروکسی آپاتیت متخلخل است که برپایه متورم شدن نشاسته در دمای ۸۰°C درحضور آب است. که می‌تواند استحکام کم در حدود ۲MPa برای کسر حجمی ۷۰٪ تخلخل و استحکام بالای ۱۵MPa برا کسر حجمی تخلخل حدود ۴۵٪ فراهم کند[۲۲].

غیر از تهیه مواد متخلخل که در مورد آن‌ها بحث شد با این روش می‌توان بدنه‌های رسانا تهیه کرد. سرامیک‌های متخلخل و رسانای الکتریکی کاربردهای روبه‌رشدی در گسترش الکترودهای الکتروکاتالیستی با عملکرد بالا برای اکسیداسیون متانول و الکترولیز آب دارند. این مواد متخلخل پتانسیل بالایی برای کاربردهایی مانند فیلترها، برای هوادهی مایعات، غشاهای رسانا، دریچه‌های اگزوز و همچنین برای اکسیداسیون غیرکاتالیزوری گازهای سمی از خود نشان می‌دهند. گرچه سرامیک‌های متخلخل به‌طور طبیعی عایق جریان الکتریسیته هستند اما نیاز است برای کاربردهای مذکور که این سرامیک‌های متخلخل رسانا شوند. یکی از روش‌های تهیه این کامپوزیت‌ها ریخته‌گری آن‌ها با سخت‌کردن نشاسته و زینتر احیای آن است. چاوز و همکارانش دوغاب آلومینایی را با نشاسته تهیه کردند و درون قالب ریختند سپس با حرارت دادن آن در دمای ۸۰°C بدنه‌های آلومینایی تهیه

[1] Garrido

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]

شده و زینتر احیایی شدند. بدین ترتیب تخلخل‌ها ایجاد و کربن ناشی از زینتر احیایی در این بدنه‌ها حضور یافت که با تغییر رنگ قابل مشاهده بود [۲۳].

۳-۳- اکستروژن

پلاستیسیته مناسب برای تضمین یک اکستروژن موفق برای خمیرهای سرامیکی یک امر ضروری است. بسیاری از مواد سرامیکی مانند Al_2O_3 و Si_3N_4 غیرپلاستیک هستند. بنابراین مقدار خاصی از چسب مایع یا چسب جامد محلول در آب به صورت محلول به ترکیب بدنه اضافه می‌شود تا خواص پلاستیک و رئولوژیکی مناسب را به خمیر بدهد. نشاسته به دلیل ارزان بودن و موثر بودن به صورت مستقیم به ترکیب بدنه اضافه می‌شود [۲۴].

یانگ[1] و همکارانش بدنه‌های متخلخل آلومینایی را به منظور کاربرد به‌عنوان غشا تهیه کردند. آن‌ها از نشاسته ذرت، آلومینا و بنتونیت برای تهیه خمیر قابل اکسترود استفاده کردند و بدنه‌های آلومینایی را اکسترود کردند [۲۵]. بدنه‌های متخلخل Si_3N_4 به روش‌های پرس خشک، ریخته‌گری دوغابی، ریخته‌گری نواری تهیه شده‌اند اما بازدهی این روش‌ها پایین و هزینه تولیدشان بالا است. روش اکستروژن نیز برای شکل‌دهی آن‌ها به دلیل بازدهی بالا و هزینه تولید کم استفاده شده است. در فرآیند اکستروژن چسب‌هایی مانند رس، نشاسته، و رزین یک جز اساسی در ساخت خمیر پلاستیک قابل اکسترود هستند. از طرف دیگر، چسب‌ها باید پیش از زینتر از بدنه خام با حرارت حذف شوند [۲۶]. در تهیه بدنه‌های Si_3N_4 متخلخل با اکستروژن توسط جیانگ[2] و همکارانش، Si_3N_4 با Y_2O_3 بعنوان کمک‌زینتر و نشاسته بعنوان عامل تخلخل زا مخلوط شده و با افزودن آب و هم زدن آن خمیر مناسب تهیه شده و اکسترود شد درنهایت بدنه‌ها خشک شده سپس در ۱۷۵۰ درجه زینتر شدند [۲۶، ۲۴].

۳-۴- ریخته‌گری نواری

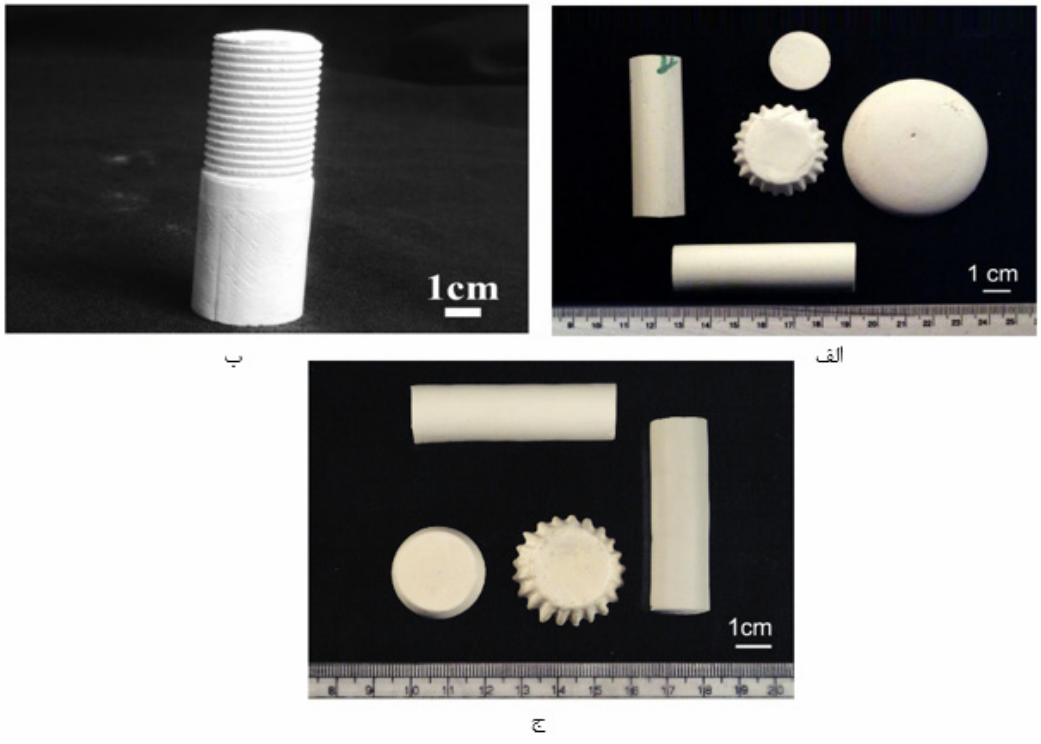
برای تهیه نوارهای سرمت پایه مس برای کاربرد به‌عنوان آند در سلول‌های سوختی اکسیدی جامد، لازم است ابتدا، زمینه YSZ متخلخل سنتز کرد. که با آغشته کردن با نمک‌های مس این سرمت‌ها را تهیه شوند. آلبانو[3] و همکارانش این ورقه‌های YSZ متخلخل را با استفاده از ریخته‌گری نواری[4] از دوغاب غلیظ شامل پودر YSZ، نشاسته بعنوان عامل تخلخل‌زا و عوامل پراکنده‌ساز و چسب و پلاستی‌سایزر تهیه کردند و پس از زینتر، فیلم‌های متخلخل تهیه کردند [۲۷].

۴- تراشکاری قطعات خام سرامیک با استفاده از نشاسته

استفاده از عامل ژل شونده در شکل‌دادن بدنه‌های سرامیکی باعث افزایش مقاومت مکانیکی قطعات و استحکام می‌شود [۲۸]. اهمیت استحکام و مقاومت مکانیکی در ماشین‌کاری قطعات و جابجایی آن‌هاست [۱].در صنعت به‌دلیل درجه سختی که سرامیک‌ها دارند، ماشین‌کاری خام قطعات سرامیکی به ماشین‌کاری قطعات زینتر شده ترجیح داده می‌شوند. این جایگزینی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد [۸]. پارامتر کلیدی برای ماشین‌کاری قطعات سرامیکی استحکام شکست است: بدنه خام باید به‌اندازه کافی مستحکم باشند تا در مقابل تنش‌های اعمالی با ماشین‌کاری و بستن بدون شکست مقاومت کنند [۲۸]. روش سخت کردن مستقیم نشاسته یکی از روش‌هایی است که قطعات را می‌توان نزدیک به ابعاد نهایی شکل داد که بدنه‌های خام همگن با قابلیت ماشین‌کاری خام با این روش به دست می‌آیند. استحکام ناشی از ژل شدن نشاسته امکان تراشکاری قطعات تهیه شده با این روش را می‌دهد [۷]. در امتیازنامه ثبت اختراع ابزار برش سرامیکی که با ویسکر SiC تقویت شده‌اند با استفاده از این روش شکل‌دهی تهیه شدند. که این ابزار عمدتا برای ماشین‌کاری مواد مقاوم حرارتی و ماشین‌کاری آهن ریخته‌گری شده استفاده می‌شوند [۲۹]. شکل ۴ تصویر برخی نمونه‌های آلومینایی شکل‌دهی شده با روش ریخته‌گری سخت‌کردن نشاسته را نشان می‌دهد.

[1] Yang
[2] Jiang
[3] Albano
[4] Tape casting

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]



شکل ۴- نمونه‌های آلومینایی تهیه شده با روش ریخته‌گری با سخت کردن نشاسته
الف) نمونه‌های خام ب) نمونه‌های خام تراشکاری شده ج) نمونه‌های زینتر شده[4]

۵- نتیجه‌گیری

نشاسته در ساخت بدنه‌های سرامیکی دو نقش عمده ایفا می‌کند: به‌عنوان چسب و عامل اتصال ذرات سرامیکی در حالت خام و همچنین عامل تخلخل‌زا در دمای بالا و در اثر سوختن. افزودن نشاسته به‌عنوان چسب در بدنه‌های سرامیکی باعث افزایش استحکام خام قطعه می‌شود و همچنین امکان تراشکاری قطعه در حالت خام را فراهم می‌کند. عموما با افزایش میزان نشاسته میزان تخلخل نیز افزایش یافته و بنابراین باعث کاهش استحکام قطعه و کاهش چگالی می‌شود. نوع نشاسته مصرفی، ویژگی‌ها، اندازه، قابلیت تورم و غیره بر میزان، شکل و مورفولوژی تخلخل، ریزساختار، چگالی و استحکام قطعات متخلخل تاثیرگذار است.

مراجع

[1] S. R. Sangawar, J. P. Agarwal, and D. B. Sarwade, “A comprehensive study on some binders for piezo-electric ceramics,” 2001.
[2] E. Gregorová, Z. Živcová, and W. Pabst, “Starch as a Pore - forming and Body - forming Agent in Ceramic Technology,” Starch - Stärke, vol. 61, no. 9, pp. 495–502, 2009.
[3] L. Janssen and L. Moscicki, Thermoplastic starch. John Wiley & Sons, 2009.
[4] E. Týnová, W. Pabst, and J. Mikač, “Starch swelling and its role in modern ceramic shaping technology,” in Macromolecular symposia, 2003, vol. 203, no. 1, pp. 295–300.
[5] A. Bertolini, Starches: characterization, properties, and applications. CRC Press, 2009.
[6] A. Díaz and S. Hampshire, “Characterisation of porous silicon nitride materials produced with starch,” J. Eur. Ceram. Soc., vol. 24, no. 2, pp. 413–419, 2004.
[7] K. Lindqvist and E. Carlström, “Green machining of alumina formed by CIP, starch consolidation and latex slip casting,” in Key Engineering Materials, 2002, vol. 206, pp. 301–304.
[8] M. L. Sandoval, M. A. Pucheu, M. H. Talou, A. G. T. Martinez, and M. A. Camerucci, “Mechanical evaluation of cordierite precursor green bodies obtained by starch thermogelling,” J. Eur. Ceram. Soc., vol. 29, no. 16, pp. 3307–3317, 2009.
[9] E. M. M. Escola and E. M. Marins, “COMMERCIAL STARCH CONSOLIDATION (SiC) CERAMICS,” 2015.
[10] O. Lyckfeldt and J. M. F. Ferreira, “Processing of porous ceramics by ‘starch consolidation,’” J. Eur. Ceram. Soc., vol. 18, no. 2, pp. 131–140, 1998.
[11] M. L. Sandoval, M. H. Talou, P. M. de Souto, R. Kiminami, and M. A. Camerucci, “Microwave sintering of

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]

cordierite precursor green bodies prepared by starch consolidation," Ceram. Int., vol. 37, no. 4, pp. 1237–1243, 2011.
[12] M. H. Talou and M. A. Camerucci, "Processing of porous mullite ceramics using novel routes by starch consolidation casting," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 35, no. 3, pp. 1021–1030, 2015.
[13] H. M. Alves, G. Tarı, A. T. Fonseca, and J. M. F. Ferreira, "Processing of porous cordierite bodies by starch consolidation," Mater. Res. Bull., vol. 33, no. 10, pp. 1439–1448, 1998.
[14] J. L. Minatti, J. G. A. Santana, R. S. Fernandes, and E. Campos, "Alumina developed by pre-gelling starch consolidation (PSC)," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 29, no. 4, pp. 661–668, 2009.
[15] E. Gregorová and W. Pabst, "Process control and optimized preparation of porous alumina ceramics by starch consolidation casting," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 31, no. 12, pp. 2073–2081, 2011.
[16] Z. Živcová, E. Gregorová, W. Pabst, D. S. Smith, A. Michot, and C. Poulier, "Thermal conductivity of porous alumina ceramics prepared using starch as a pore-forming agent," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 29, no. 3, pp. 347–353, 2009.
[17] R. M. Khattab, M. M. S. Wahsh, and N. M. Khalil, "Preparation and characterization of porous alumina ceramics through starch consolidation casting technique," Ceram. Int., vol. 38, no. 6, pp. 4723–4728, 2012.
[18] S. Li, C.-A. Wang, and J. Zhou, "Effect of starch addition on microstructure and properties of highly porous alumina ceramics," Ceram. Int., vol. 39, no. 8, pp. 8833–8839, 2013.
[19] W. Pabst, E. Gregorov, I. Sedl????ov??, and M. ??ern??, "Preparation and characterization of porous alumina-zirconia composite ceramics," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 31, no. 14, pp. 2721–2731, 2011.
[20] L. B. Garrido, M. P. Albano, L. A. Genova, and K. P. Plucknett, "Characterization of porous zirconia prepared from potato starch."
[21] L. B. Garrido, M. P. Albano, K. P. Plucknett, and L. Genova, "Effect of starch filler content and sintering temperature on the processing of porous 3Y–ZrO 2 ceramics," J. Mater. Process. Technol., vol. 209, no. 1, pp. 590–598, 2009.
[22] I. Sopyan, M. Mel, S. Ramesh, and K. A. Khalid, "Porous hydroxyapatite for artificial bone applications," vol. 8, pp. 116–123, 2007.
[23] R. L. Menchavez, M. Fuji, T. Shirai, and T. Kumazawa, "Electrically conductive porous alumina/graphite composite synthesized by starch consolidation with reductive sintering," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 34, no. 3, pp. 717–729, 2014.
[24] G. P. Jiang, J. F. Yang, J. Q. Gao, G. P. Jiang, J. F. Yang, and J. Q. Gao, "Effect of starch on extrusion behaviour of ceramic pastes Effect of starch on extrusion behaviour of ceramic pastes," vol. 8917, no. August, 2017.
[25] G. C. C. Yang and C.-M. Tsai, "Effects of starch addition on characteristics of tubular porous ceramic membrane substrates," Desalination, vol. 233, no. 1, pp. 129–136, 2008.
[26] G. Jiang, J. Yang, and J. Gao, "Extrusion of porous silicon nitride using different binders," vol. 11, no. 1, pp. 126–128, 2010.
[27] P. Albano, L. A. Genova, L. B. Garrido, and K. Plucknett, "Processing of porous yttria-stabilized zirconia by tape-casting," vol. 34, pp. 1983–1988, 2008.
[28] M. H. Talou, A. G. T. Martinez, and M. A. Camerucci, "Green mechanical evaluation of mullite porous compacts prepared by pre-gelling starch consolidation," Mater. Sci. Eng. A, vol. 549, pp. 30–37, 2012.
[29] G. Brandt, O. Lyckfeldt, and C. Sjögren, "Method of manufacturing whisker-reinforced ceramics." Google Patents, 02-Oct-2002.
[30] J. Chandradass, K. H. Kim, D. sik Bae, K. Prasad, G. Balachandar, S. A. Divya, and M. Balasubramanian, "Starch consolidation of alumina: fabrication and mechanical properties," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 29, no. 11, pp. 2219–2224, 2009.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.3.55.1.6]