



مهندس امیر حسین واحدی فر،
نویسنده‌ی اول مقاله، دانشگاه
آزاد اسلامی واحد علوم و
تحقیقات

بررسی ویژگی‌های قالب‌های سرامیکی پره‌های توربین تک کریستال و پلی کریستال در ریخته‌گری دقیق

امیر حسین واحدی فر^۱، علی رضا میرک^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

^۲ عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده: پره‌های توربین بر اساس ساختار کریستالوگرافی و کنترل ریزساختار به ۳ دسته تقسیم می‌شوند و در واقع ۳ روش برای کنترل رشد دانه‌ها در ساخت پره‌های توربین داریم. بر اساس این ۳ روش موجود خواص قالب‌ها نیز متفاوت خواهد بود. در این مقاله به بررسی ویژگی‌های مورد نیاز قالب‌های سرامیکی پوسته‌ای مورد استفاده در ریخته‌گری دقیق پره‌های توربین پلی کریستال و انجماد جهت دار تک کریستال، و بیان تفاوت‌های موجود، پرداخته‌ایم. در بررسی‌های به عمل آمده، پره‌های توربین انجماد جهت دار تک کریستال در دمای کاری بالاتری استفاده می‌شوند و در نتیجه ریخته‌گری آن‌ها در دمای نزدیک به ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان نگهداری حدود ۲ ساعت انجام می‌شود که نسبت به گرید پلی کریستال دمای بالاتری محسوب می‌شود، در نتیجه خواص قالب نیز بایستی متناسب با این شرایط کاری باشد.

کلمات کلیدی: قالب سرامیکی پوسته‌ای، ریخته‌گری دقیق، پره‌های توربین انجماد جهت دار، پره‌های پلی کریستال.

۱- مقدمه

پره‌های توربین از اجزا مجموعه توربین‌های گازی هستند که با هندسه و ساختار و ویژگی‌های مکانیکی خاص و با تلورانس ابعادی دقیق ساخته می‌شوند. پره‌های توربین تک کریستال در محیط‌های دما بالا و فشار بالا و پرتنش استفاده می‌شوند پره‌های توربین با روش ریخته‌گری مذاب آلیاژ در قالب سرامیکی پوسته‌ای تولید می‌شوند و قالب پوسته‌ای تک کریستال تحت دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. بنابراین، کیفیت قالب سرامیکی مورد مصرف در ریخته‌گری جهت‌دار، به صورت مستقیم بر کارایی، دقت ابعادی، درصد تولید محصول و هزینه تولید قطعه سوپرآلیاژ تک کریستال تاثیرگذار است [۱]. آقای بیللی^۱ در سال ۱۹۹۵ ویژگی‌های مورد نیاز قالب‌های سرامیکی مورد استفاده در ساخت پره‌های پلی کریستال را عنوان کرد [۲]. در سال ۲۰۰۳ آقای جونز و همکارانش^۲ در تحقیقات خود، روشی برای تولید قالب‌های سرامیکی با افزودن فیبر معرفی نمودند و در نهایت با قالب‌های ساخته شده با افزودنی پلیمری مقایسه کردند که، تحقیقات اولیه نشان دادند، افزودن فیبر از نظر زمان، اقتصادی و وزن قالب ایجاد شده برای ساختن قالب استاندارد ریخته‌گری دقیق بسیار مفید است [۳]. وو و همکارانش^۳ در سال ۲۰۱۳ یک روش تولید داخلی برای تولید قالب‌های سرامیکی برای تولید پره‌های توربین پیچیده ایجاد کرده‌اند که تلفیقی از تکنولوژی استریولیتوگرافی و ریخته‌گری ژل^۴ است [۴]. در تحقیقات سال ۲۰۱۴ آقای دانگ^۵ و در سال ۲۰۱۵ آقای کوبیاک^۶ به صورت اختصاصی ویژگی‌های قالب‌های مورد استفاده در ریخته‌گری دقیق پره‌های توربین انجماد جهت دار گزارش شد [۵و۶]. در نهایت در سال ۲۰۱۸

¹ P.R.Beeley

² S. Jons

³ Wu et al.

⁴ Stereolithography- gelcasting

⁵ H. Dong

⁶ K. Kubiak

آقای زیلینگ ژو^۱ و همکارانش رفتار مکانیکی و ریزساختار دما بالای قالب‌های سرامیکی پایه آلومینیایی برای ریخته گری جهت‌دار بررسی شد. آنها گزارش کردند که عملیات حرارتی باعث پر شدن حفرات توسط فاز شیشه ای سیلیکاتی می‌شود که باعث افزایش استحکام فشاری قالب‌ها در دمای اتاق می‌شود. [۷]. در این مقاله ضمن معرفی ویژگی‌های قالب‌های سرامیکی در ساخت پره‌های توربین با گرید پلی کریستال و انجماد جهت دار، خواص حرارتی قالب‌های گرید انجماد جهت دار تحلیل شده است.

۲- ویژگی‌های قالب سرامیکی پوسته‌ای پره‌های پلی کریستال و انجماد جهت دار

خواص اصلی قالب‌های ریخته‌گری دقیق پره‌های توربین، چه در گرید پلی کریستال و چه در گرید انجماد جهت دار، عمدتاً یکسان هستند. علت این است که این قالب‌ها از مواد اولیه مصرفی و روش ساخت یکسانی بهره می‌برند، که تعیین ترکیب این قالب‌ها وابسته به نوع آلیاژ و دمای کاری مورد استفاده می‌باشد. به عبارت دیگر، پوسته سرامیکی به دور مدل مومی، شامل چند لایه یا چند مرحله‌ای پوشش داده می‌شود. معمولاً این فرآیند بین ۵ تا ۱۵ مرحله و بر اساس نیاز قالب و استحکام مدنظر می‌باشد. که این خود نمونه‌ای از تفاوت‌های این قالب‌هاست [۲]. آقای جونز و همکارانش در تحقیقات خود در گرید پلی کریستال با ۴ لایه پوشش و قطر پوسته ۴/۶ میلی متر استفاده کرده‌اند [۳]. این در حالی است که آقای زیلینگ ژو در سال ۲۰۱۸ برای گرید انجماد جهت دار از قالب ۷ لایه‌ای با ضخامت ۸/۸ میلی‌متر استفاده نموده است. البته ضخامت قالب‌ها بسته به نوع آلیاژ مصرفی نیز متغیر هستند. اما در گرید انجماد جهت دار ضخامت لایه‌ها بیشتر است [۷].

در مرحله بعدی، هر پوشش با فروبردن مدل مومی درون دوغاب سرامیکی تهیه می‌شود. نمونه پوشش داده شده برای مدت کوتاهی خشک می‌شود و یک پوشش^۲ عاری از شیارها و مسیرهای^۳ سطحی ایجاد می‌شود. قبل از آنکه لایه پوشش داده شده خشک شود، بر روی سطح پوشش داده شده با ذرات درشت سرامیکی به اصطلاح استوک پوشیده می‌شود، این ذرات پاشیده شده به لایه زیرین سرامیکی که هنوز خشک نشده اند، می‌چسبند، با تکرار این کار، ضخامت قالب پوسته‌ای سرامیکی با تعداد مراحل کمتر، افزایش می‌یابد. ترکیب دوغاب و انتخاب استوک در قالب‌های گرید پلی کریستال و تک کریستال متفاوت است. در جدول ۱ مقایسه‌ای از مواد مصرفی در لایه‌های دو گرید، نشان شده است. همانطور که مشخص است، این تفاوت‌ها نه تنها بین دو گرید فوق، بلکه برای ساخت پره‌ها در یک گرید مشابه نیز تفاوت دارد.

جدول ۱- مقایسه ترکیبات مورد استفاده در ساخت قالب‌های سرامیکی پوسته‌ای [۳ و ۸]

قالب پلی کریستال	قالب انجماد جهت دار ۱	قالب انجماد جهت دار ۲
پایه آبی-سیلیکاتی	سل سیلیس کلونیدی	سیلیکای کلونیدی
سیلیکات زیرکونیم-مش ۲۰۰	سیلیکات زیرکونیم-مش ۳۲۵	فیوزد آلومینا-مش ۲۰۰
سیلیکات آلومینا-مش ۱۰۰	فیوزد آلومینا-مش ۸۰	فیوزد آلومینا-مش ۸۰
پایه آبی-سیلیکاتی	بایندر شامل فیوزد سیلیکا- آلومیناسیلیکات- زیرکون	سیلیکای کلونیدی
آلومینا سیلیکات-مش ۲۰۰	سیلیکات زیرکونیم-مش ۳۲۵	فیوزد آلومینا-مش ۳۲۵
سیلیکات آلومینا-مش ۱۰۰	فیوزد آلومینا-مش ۴۸	فیوزد مولایت-مش ۸۰

مواد سرامیکی با تنوع و گستردگی زیادی مصرف می‌شوند، از جمله پودر سیلیکا، آلومینا سیلیکات، آلومینا و سیلیکات زیرکونیم. در واقع تفاوت این قالب‌ها به تفاوت در روش تولید پره‌های توربین بر می‌گردد. به عنوان مثال؛ مشخصات گرمایی قالب پوسته‌ای می‌تواند بر انجماد آلیاژ اثر بگذارد، و استحکام قالب بر سایر مشخصات ریخته‌گری و عیوب ریخته‌گری تأثیرگذار باشد. عدم

¹ Zilin Xu

² Covering

³ Drips and runs

آگاهی و درک صحیح از اصول پوسته گذاری و همچنین مواد خام مورد استفاده از در ساخت پوسته، باعث عدم کنترل مناسب بر فرآیند می‌شود. بنابراین باعث می‌شود که خواص پوسته تهیه شده در نمونه‌های مختلف، تکرار پذیر نبوده و دائماً تغییر کند. ویژگی‌های مورد نیاز قالب‌های سرامیکی پوسته‌ای به صورت زیر می‌باشد:

- ۱) استحکام خام مناسب، به‌منظور سهولت خارج کردن موم بدون شکست قالب.
 - ۲) استحکام مناسب بعد از پخت، جهت تحمل وزن و نیروی آلیاژ ریخته‌گری.
 - ۳) به حد کافی ضعیف^۱ باشد تا از پارگی گرم آلیاژهای حساس جلوگیری شود.
 - ۴) مقاومت به شوک حرارتی بالا جهت عدم شکست در زمان ریخته‌گری آلیاژ مذاب.
 - ۵) پایداری شیمیایی بالا.
 - ۶) نفوذ پذیری و واکنش کم با مذاب آلیاژ.
 - ۷) نفوذپذیری گازی و ضریب انتقال حرارت مطلوب جهت کنترل روند خنک شدن و انجماد.
 - ۸) ضریب انبساط حرارتی پایین، جهت کاهش تغییرات ابعادی در قالب و قطعه ریخته‌گری.
 - ۹) عدم جوانه زنی توسط سوپرآلیاژ بر روی سطح قالب سرامیکی (این ویژگی مختص قالب‌های تک کریستال است).
- قبلاً هم اشاره شد که به دلیل تنوع آلیاژهای ریخته‌گری، محصولات مدنظر، ابعاد و هندسه‌های مختلف، مواد مختلفی را می‌توان به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده قالب استفاده کرد و خواص مختلفی نیز از قالب مورد نظر می‌باشد[۳]. در ذیل سعی می‌شود خواص منحصر بفرد قالب‌های سرامیکی بررسی گردد.

۱-۲- واکنش بین قالب و مذاب

ناهمواری سطح قالب باعث ناهمواری سطح قطعه ریخته‌گری می‌شود، باید در این مواقع علاوه بر نفوذ ذرات استوکو، به خاصیت تر شوندگی بین سطح درونی قالب و مذاب آلیاژ توجه شود. ناهمواری سطحی که ناشی از نفوذ آلیاژ مذاب به حفرات قالب است، معمولاً زمانی رخ می‌دهد که ترشوندگی بین سطح قالب و مذاب آلیاژ بالا باشد. با افزایش دمای آلیاژ ریخته شده، میزان ترشوندگی افزایش می‌یابد، یعنی زاویه تماس کاهش می‌یابد[۲].

دمای کاری پره‌های انجماد جهت دار بالاتر از پلی کریستال است، در نتیجه احتمال نفوذ مذاب به درون حفرات قالب بیشتر است. بنابراین لایه اول اصلی‌ترین لایه قالب است. به دلیل این که درونی‌ترین لایه و اولین لایه با مدل و با مذاب آلیاژ فلزی در تماس خواهد بود. این لایه با از نظر دمایی پایدار باشد و با مذاب نیز واکنش ندهد. اصلی‌ترین مشخصه لایه اول ضخامت آن است. این لایه باید به قدری ضخیم باشد تا دانه‌های استوکو قادر نباشند آن را تخریب کنند. اگر لایه اول شکسته شود و ذرات استوکو وارد مذاب شوند، در اثر انجماد درون آلیاژ خواهند بود و ناخالصی غیرفلزی تشکیل می‌شود. لایه خیلی ضخیم نیز، باعث ناخالص شدن^۲ مذاب آلیاژی شوند[۵]. بحث دیگر در این موضوع، عدم جوانه زنی مذاب بر روی لایه اول است که این مطلب نباید در پره‌های انجماد جهت دار پره‌های تک کریستال رخ دهد. در صورتی که در پره‌های پلی کریستال مشکلی ایجاد نمی‌کند[۶]. در بررسی‌های به عمل آمده توسط آقای سلیکا^۳، واکنش بین قالب و مذاب گزارش شده است (شکل ۱).

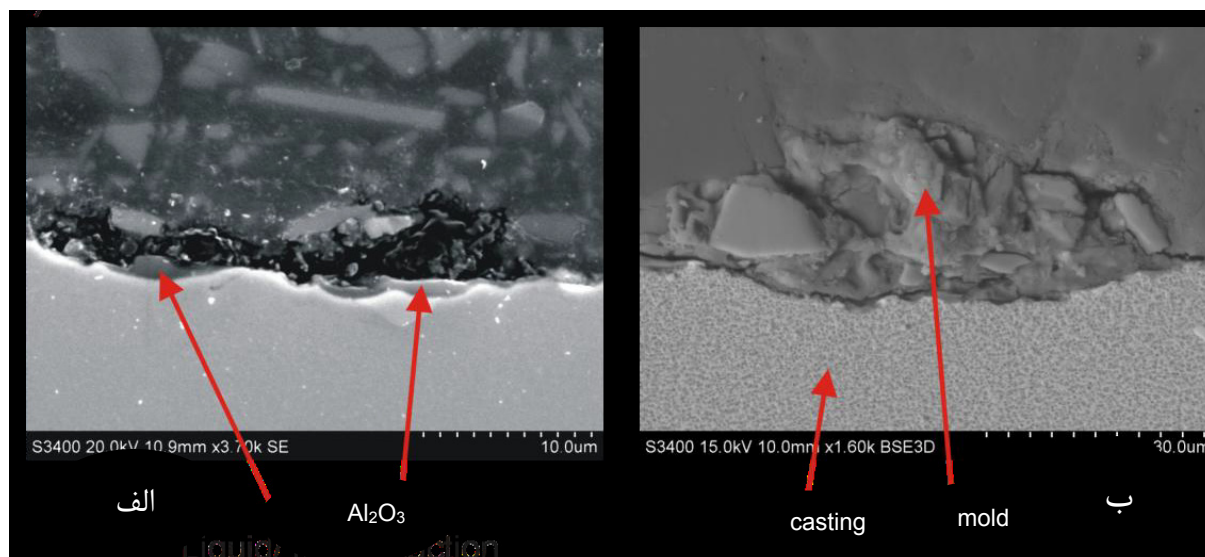
۱- بعد از ریختن مذاب آلیاژ، مذاب با لایه اصلی قالب در تماس است. در اثر واکنش بین آلومینیوم موجود در مذاب و سیلیکای موجود در قالب، آلومینا به صورت دندریتی از سطح قالب تشکیل می‌شود شکل ۱ الف. دندریت درون آلیاژ مذاب رشد می‌کند و در نهایت پس از جدایش از مذاب به سطح قالب چسبیده است. به عبارت دیگر در سطح قالب، جوانه زنی صورت گرفته است.

۲- جدا شدن لایه اکسید آلومینیوم از سطح قطعه (کاهش حجم قطعه)، باعث افزایش فاصله بین قطعه و قالب می‌شود، در نتیجه سطح قطعه مجدداً اکسید می‌شود و لایه اکسید مخلوط شامل عناصر نیکل، کروم، تیتانیوم و ... تشکیل می‌شود. لایه اکسید مخلوط رشد می‌کند، هرچند که حجم لایه اکسیدی کمتر از حجم فضای خالی است (شکل ۱ ب)[۹].

¹ weak

² Infiltration

³ D. Szeliga



شکل ۱- واکنش بین قالب و مذاب ریخته گری شده. (الف) تشکیل یک لایه آلومینا در اثر واکنش بین سیلیکا از قالب سرامیکی و آلومینیوم موجود در مذاب. (ب) تشکیل لایه اکسیدی در سطح تماس قطعه و قالب [۹].

۲-۲- زبری سطح

زبری سطحی قالب بر روی کیفیت سطح قطعه ریخته گری تأثیر گذار است و کیفیت سطحی قطعه ریخته گری شده اساساً وابسته به کیفیت سطحی قالب سرامیکی و همچنین آسیب‌های وارد شده به قطعه در زمان خارج کردن قطعه از قالب و ... است. به علاوه، سطح الگوی مومی نیز بر کیفیت سطحی قالب و قطعه ریخته گری تأثیر گذار است [۱۰].

طبق بررسی‌های به عمل آمده توسط آقای دفنگ لیا^۱ و همکارانش بر روی قالب‌های پلی کریستال، با استفاده از روش فوم فداشونده و پوشش ارتقا دهنده کیفیت سطحی در ریخته گری دقیق، بر روی قالب شامل ۳ لایه بررسی شده است. اولین لایه پوشش ایجاد شده در تماس مستقیم با آلیاژ مذاب است، در نتیجه دوغاب این پوشش تأثیر زیادی بر کیفیت سطحی قطعه خواهد داشت. برای بررسی اثر نوع بایندر بر کیفیت سطحی قالب و قطعه ریخته گری، لایه اولیه سرامیکی به ترتیب با بایندهای سیلیکات سدیم، سل سیلیکا و هیدرولیزات اتیل^۲ تهیه شده است [۱۰ و ۲].

انتخاب مواد و همچنین پارامترهای فرآیند هر دو بر کیفیت سطحی قطعه ریخته گری تأثیر گذار است. این پارامترها شامل: نوع بایندر، اندازه ذرات پرکننده و نسبت ذرات اضافه شده به دوغاب. در تحقیق مورد اشاره برای بررسی اثر اندازه ذرات فیلر استفاده شده بر زبری سطحی، از ذرات بوکسیت با مش بندی متفاوت برای ساخت دوغاب اولیه استفاده شده است [۵].

زبری سطحی قالب با افزایش اندازه عدد مش ذرات کاهش می‌یابد. با افزایش عدد مش ذرات تا ۲۰۰، ضخامت کاهش یافته و به ۲/۴ میکرومتر می‌رسد و سپس در این مقدار ثابت می‌ماند. به همین دلیل است که در قالب‌های انجماد جهت دار از ذرات با اندازه دانه ریزتر استفاده می‌کنیم (جدول ۱). زیرا کیفیت سطحی قالب برای ما بسیار اهمیت دارد و قالب ما نباید باعث ایجاد مراکز جوانه زنی شود، که این مسئله در قالب‌های مورد استفاده در گرید پلی کریستال مهم نمی‌باشد [۲].

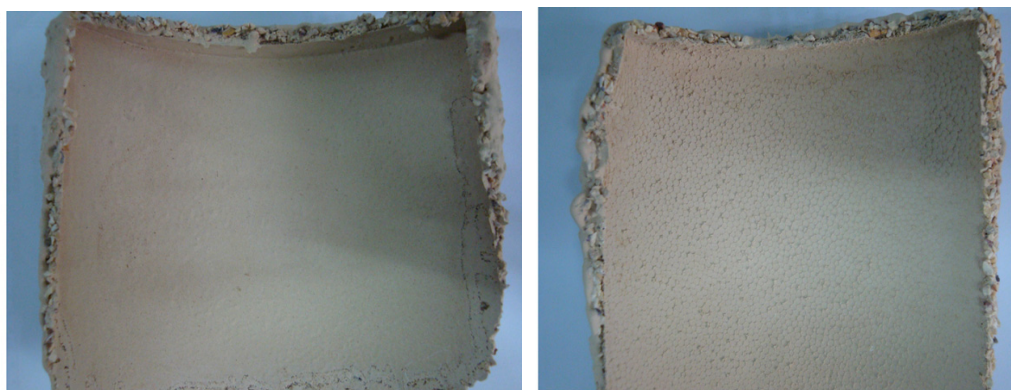
تعداد و اندازه حفرات انقباضی تعیین کننده زبری سطحی است. با درشت تر شدن دانه‌های فیلر، فاصله بین ذرات افزایش می‌یابد و این باعث بزرگ شدن حفرات انقباضی می‌شود [۱۰]. همانطور که در شکل ۲ ب مشخص است که کیفیت سطحی پوسته سرامیکی به دلیل حذف شدن ناهمواری‌ها و زبری‌ها به شدت افزایش یافته است. کیفیت سطحی با ایجاد پوشش فشرده و یکنواخت بهبود یافته است. پوشش نه تنها شیارهای فوم را بر طرف می‌کند بلکه از طرفی از ورود دوغاب به درون حفرات ریز فوم جلوگیری می‌کند. پوشش نیترو سلولز باعث می‌شود تا زبری سطحی فوم و قالب کاهش یابد.

در قالب‌های انجماد جهت دار به دلیل انجام عملیات حرارتی و پر شدن حفرات توسط سیلیکا این حفرات انقباضی کمتر است [۷].

¹ Defeng Liao

² hydrolysates of ethyl

کیفیت ریزساختار سطحی و همچنین زبری سطحی قالب و در نتیجه قطعه ریخته‌گری شده وابسته به استفاده از ذرات استوک و ذرات پودر مناسب که برای ساخت دوغاب پوشش اولیه استفاده شده است [۱۱].



الف

ب

شکل ۲- مورفولوژی سطح پوسته سرامیکی الف) الگوی فوم بدون پوشش در سطح پوشش‌ها ب) الگوی فوم پوشش داده شده با صاف کردن سطح [۱۰].

۲-۳- استحکام خام و پخت دما بالا

استحکام خام قالب‌ها عبارت است از عدم ترک خوردن قالب به هنگام خروج موم و یا در اثر حمل و نقل. فرآیند خروج موم به خارج کردن الگوی از جنس موم، از درون قالب پوسته‌ای سرامیکی گفته می‌شود که خود می‌تواند باعث ایجاد لایه‌لایه شدن شود [۱۱]. بایندهای مورد استفاده در قالب‌های پلی کریستال معمولاً شامل ۲۰-۳۰ نسبت وزنی سیلیکای آمورف می‌باشند که با افزودن یون سدیم پایدار می‌شوند. بایندهای کلئیدی، استحکام خام به قالب می‌دهند، به همین دلیل در زمان خروج موم و کار با قطعه، ترک خوردن بسیار محتمل است. برای رفع این مشکل از پلیمرهای مایع استفاده می‌شود. برای بایندهای آلکالین از لاتکس و برای بایندهای اسیدی از PVA استفاده می‌شود. افزودن پلیمر باعث افزایش استحکام حالت خام قالب شده و از طرفی در زمان ایجاد پوشش‌های بعدی، مانع از انتقال آب و رطوبت به پوشش زیرین می‌شود. استفاده از سدیم باعث تسریع بلورینه شدن می‌شود، در نتیجه قالبی مستحکم ایجاد می‌شود.

پوسته سرامیکی باید توانایی تحمل دماهای بسیار بالا را داشته باشد و اگر مواد دوغاب و استوک صحیح انتخاب شود، قابلیت استفاده برای آلیاژهای متنوع و روش‌های ریخته‌گری مختلف را خواهد داشت [۲]. سه دلیل وجود دارد که قالب قبل از کاربرد در ریخته‌گری پخته می‌شود:

۱- برای حذف شدن باقی‌مانده‌های مواد موم الگو و محلول‌های سرامیکی

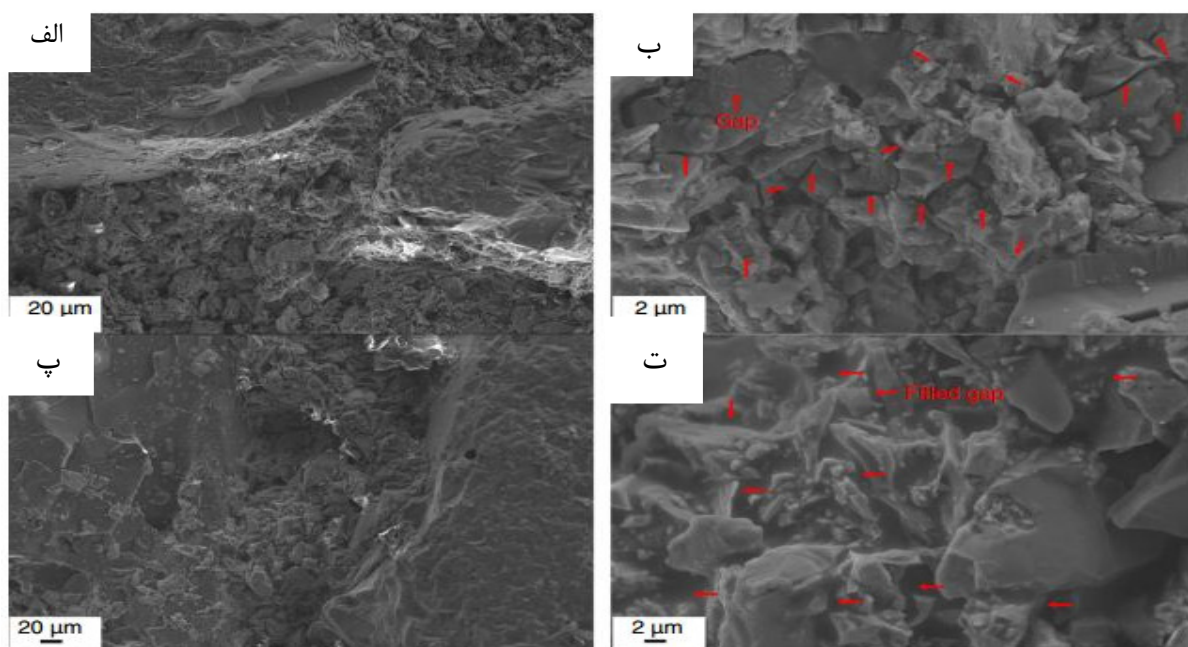
۲- زینتر شدن ساختار سرامیکی

۳- آماده کردن قالب برای ریخته‌گری در دماهای مشخص از پیش تعیین شده

برای رسیدن به حد خنثی بودن مناسب قالب و همچنین پایداری مناسب، پخت قالب‌های پلی کریستال در بازه دمایی ۵۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد و عملیات حرارتی آنها در بازه ۹۵۰-۱۱۰۰ درجه سانتی گراد انجام می‌شود. در صورتی که همین فرآیند مربوط به ریخته‌گری جهت‌دار، پخت در بازه دمایی ۹۵۰-۱۱۰۰ و عملیات حرارتی در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد استفاده می‌شود. در این فرآیند، آلیاژ مذاب باید برای ۲ ساعت به صورت مذاب باقی بماند درحالی‌که انجماد پیش روی می‌کند، دمای قالب باید بالاتر از دمای ذوب آلیاژ مصرفی باشد. سوپر آلیاژهای تک کریستال در بازه دمایی ۱۵۰۰-۱۶۰۰ درجه سانتی گراد ذوب می‌شوند. اما قالب‌های ساخته شده با سیلیکا در گرید پلی کریستال محدود به بیشینه دمای ۱۵۵۰ درجه سانتی گراد است، زیرا دمای ذوب سیلیکا نیز در همین حدود است [۲].

تحقیقات نشان داده‌اند که استحکام پخت قالب‌های سرامیکی انجماد جهت دار می‌بایست از قالب‌های معمولی بالاتر باشند. در

بررسی‌های آقای زلینگ ژو^۱ بر روی قالب‌های انجماد جهت دار، همانطور که در شکل ۳ ب مشخص است، در نمونه زینتر شده، بین ذرات، فاصله^۲ زیادی مشاهده می‌شود، در حالی که در نمونه عملیات حرارتی شده این فاصله‌های کوچک پر شده و مجدداً زینتر شده و ذرات درشت تر تشکیل شده است (شکل ۳ ت). ترکیب موجود در فاصله‌های موجود غالباً کریستوبالیت بتا است که در دمای اتاق به کریستوبالیت آلفا تبدیل می‌شود. در اثر زینتر مجدد، استحکام قالب سرامیکی در دمای اتاق مجدداً افزایش می‌یابد [۱۰ و ۷].



شکل ۳- تصویر SEM ریزساختار نمونه‌های زینتر شده و عملیات حرارتی شده. الف و ب) ریزساختار زینتر شده در دو بزرگنمایی مختلف. پ و ت) ریزساختار نمونه عملیات حرارتی شده در دو بزرگنمایی [۷]

۲-۴- ضریب انبساط حرارتی

یکی از مشخصات برجسته در بررسی قالب‌ها، افزایش و کاهش حجم و یا یکنواخت نبودن ضریب انبساط حرارتی با افزایش دما برای هر قالبی است. برای مثال در برخی دماهای بالاتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش حجم یکنواخت است اما در ادامه با افزایش حرارت افت می‌کند. در واقع، ماده روند کاهش حجم را طی می‌کند. دمایی که در آن کاهش حجم داریم، نه تنها برای فرمول‌های مختلف مواد قالب بلکه با تغییر مواد مصرفی فیلر و استوکوک^۳ مورد استفاده در ساخت نمونه نیز تا حدی^۴ متفاوت خواهد بود [۹].

نکته دیگری که باید در تحلیل داده‌های انبساط حرارتی مورد توجه باشد، نرخ اعمال حرارت نتایج را تغییر خواهد داد. بدون درک صحیح از فعل و انفعالات اساسی شیمیایی و فیزیکی در ساختار سرامیکی مواد قالب در مرحله پخت قالب، تحلیل و توجیه مشخصات قالب سخت می‌باشد [۹].

فرآیند دیگری که به خوبی شناخته شده است و در ذرات سرامیکی در حال گرم شدن و سرد شدن رخ می‌دهد، استحاله فازی^۵ است، این تغییرات می‌تواند باعث دفرم شدن و انحنادار شدن قالب پوسته‌ای شود. سیلیکا هم ممکن است به صورت فاز آمورف-شیشه‌ای^۶ باشد و هم به صورت بلوری در ساختارهای فازی و با چگالی‌های مختلف باشد. تمام این فرم‌های مختلف سیلیکا قابل

¹ Zilin Xu

² gap

³ different batches of filler or stucco

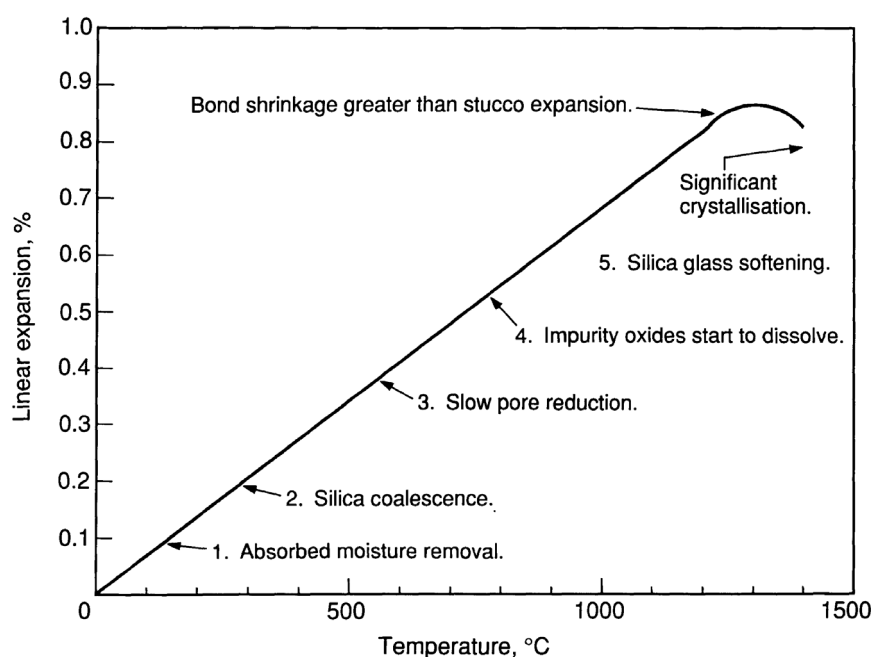
⁴ Marginally

⁵ Phase change

⁶ fused silica

تبدیل به یکدیگر هستند، این تغییرات با تغییر چگالی همراه است (شکل ۴). در حالت بلوری، تغییر حجم در یک دمای مشخص و به صورت ناگهانی رخ می‌دهد. سیلیکای آمورف مانند استوکوه‌های سیلیکایی آمورف و یا ساختار ژل بایندر سیلیکایی، در دماهای بالا بلوری می‌شود. درصد قابل ملاحظه‌ای کریستوبالیت در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود. نرخ بلورینه شدن بستگی به زمان و دمای پخت قالب سرامیکی و همچنین نوع و درصد ناخالصی‌های موجود در ترکیب قالب دارد. تلفیق سیلیکای آمورف و بلوری، که در ساختار پوسته وجود دارد، اصلی‌ترین عامل تأثیرگذار^۱ بر مشخصات رفتار قالب سرامیکی تهیه‌شده از سیلیکا است [۱۲].

اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی از دمای اتاق تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به قالب‌هایی که برای ریخته‌گری پلی کریستال استفاده می‌شود، در صورتی که این بررسی‌ها برای ریخته‌گری جهت‌دار کافی نیست. در این شرایط، بررسی مشخصات تا دمای ۱۵۵۰، یعنی دمای کاری قالب در ریخته‌گری درجه سانتی‌گراد ضروری است [۱۳].



شکل ۴- نمودار ضریب انبساط حرارتی یک نمونه سرامیکی، نشان دهنده تغییرات فازهای سیلیکاتی با افزایش دما [۲]

۲-۵- مقاومت به پارگی گرم

استحکام بیش از حد قالب، باعث پارگی گرم و ترک در قطعه ریخته‌گری می‌شود. این حالت، زمانی رخ می‌دهد که آلیاژ نسبتاً استحکام پائینی داشته و در دمای انجماد ترد باشد، سطح قطعه نیز اکسید می‌شود. زمانی که آلیاژ فلزی منجمد و خنک می‌شود، تنش فشاری ممکن است به برخی از قسمت‌های قطعه وارد شود، زیرا قالب سرامیکی با نرخ کمتری منقبض می‌شود. این تفاوت می‌تواند باعث آسیب دیدن قطعه از قبیل اعوجاج، ترک داغ، پارگی گرم^۲، تنش‌های پسماند و... شود.

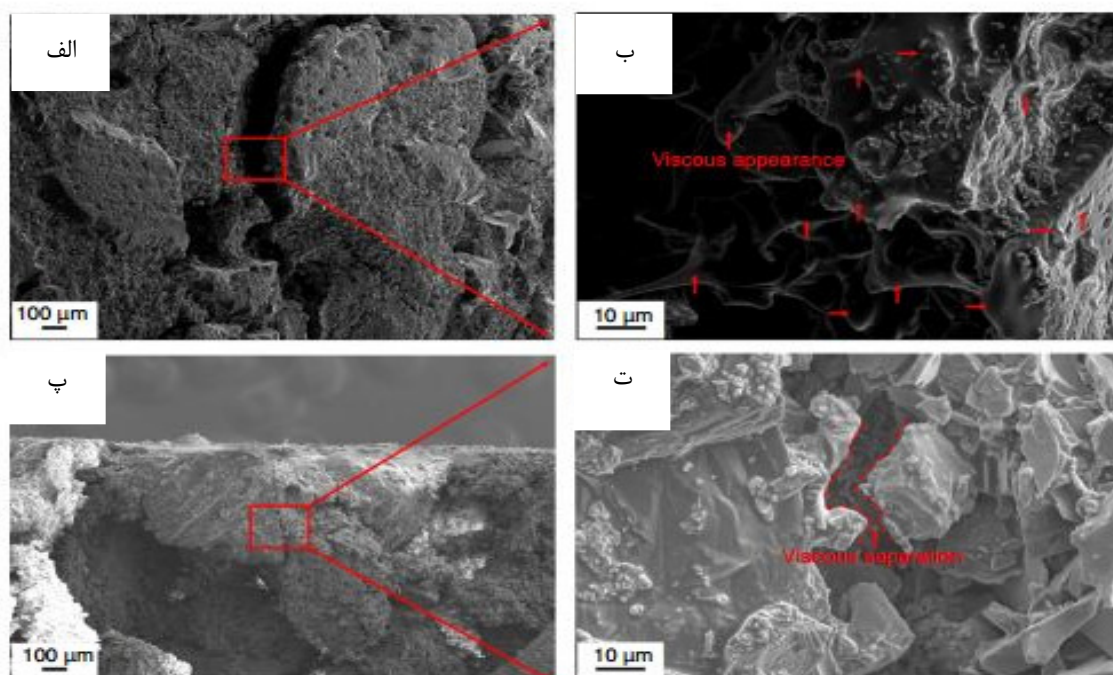
برخی قالب‌های سرامیکی اصلاح ساختاری نشده^۳ بسیار مستحکم بوده و در انجماد منجر به ایجاد پارگی گرم قطعه می‌شود. استفاده از پلیمر افزودنی در بایندر، باعث اصلاح ساختار می‌شود. زیرا فاز پلیمری در نهایت سوخته و از ساختار قالب خارج می‌شود. به علاوه فاز پلیمری باعث افزایش نفوذپذیری قالب می‌شود در نتیجه میزان قطعات خراب و عدم پر شدن قالب توسط مذاب کاهش می‌یابد [۱۰ و ۳]. خواص مکانیکی دمای بالای قالب‌های سرامیکی استفاده شده در ریخته‌گری جهت‌دار سوپرآلیاژهای به ندرت در مراجع ذکر شده است. مطالعه خواص مکانیکی دمای بالا، نقش مهمی در پایداری ابعادی پره توربین، افزایش میزان تولید ریخته‌گری دارد. اخیراً در تحقیقات آقای زلینگ ژو ثابت شد که در دماهای زیر ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

¹ contribution

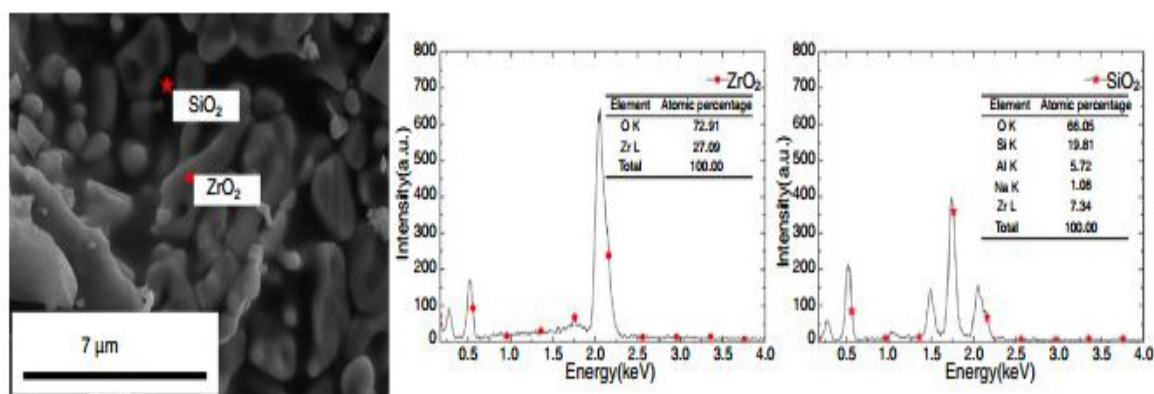
² Hot tearing-hot cracking

³ unmodified

شکست قالب‌ها از نوع شکست ترد و از درون ذرات فیلر اتفاق می‌افتد، اما در دماهای بالاتر از ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد، به دلیل تشکیل یوتکتیک، لغزش ویسکوز و جدایش ویسکوز^۱ سیلیکا است. شکست از نوع ترموالاستیک و ترمو پلاستیک می‌باشد [۷]. همانطور که در شکل ۵ ب و ت نشان داده شده است، جدایش در محل ترک برای نمونه‌های زینتر شده و عملیات حرارتی شده از نوع ویسکوز است. محل ترک برای نمونه‌های دمای بالا در منطقه نیمه جامد ویسکوز و اطراف ذرات درشت آلومینا است. ترکیب یوتکتیک شامل زیرکونیا و سیلیکا ZrO_2-SiO_2 در شکل ۲ مشخص شده است. همچنین ساختار یوتکتیکی نزدیک ذرات درشت آلومینا است.



شکل ۵- تصویر SEM از نواحی شکست نمونه‌های قالب سرامیکی. الف و ب (نمونه‌های زینتر شده. پ و ت) نمونه‌های عملیات حرارتی شده [۷]



شکل ۶- تصویر SEM ریزساختار و آنالیز شیمیایی منطقه یوتکتیک [۷]

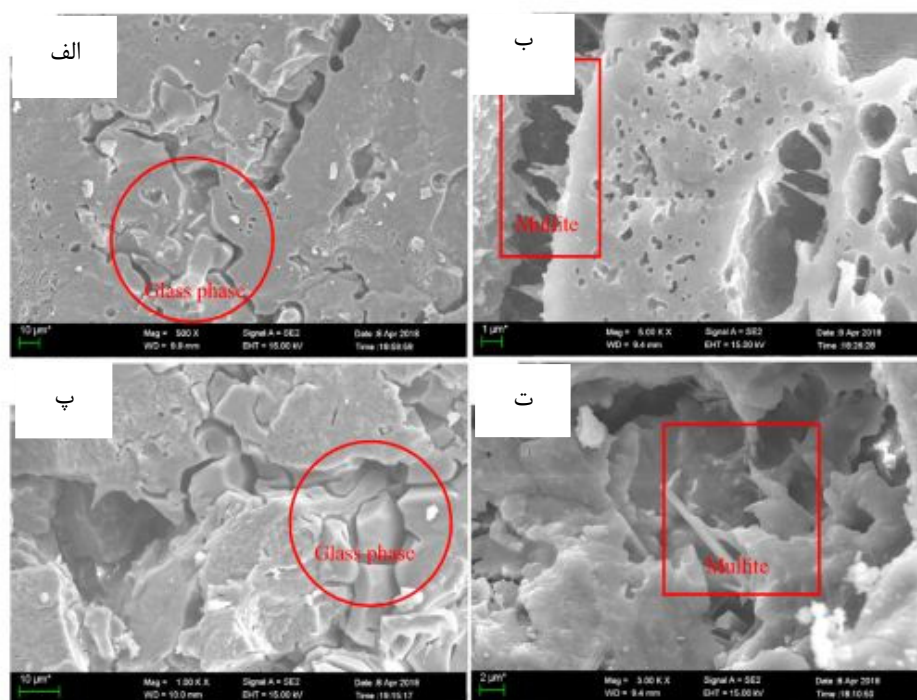
۲-۶- پایداری حرارتی - شیمیایی قالب

پایداری حرارتی- شیمیایی قالب بستگی به فیلر و بایندر استفاده شده دارد. به عنوان مثال قطعات ریخته‌گری که با قالب‌های مختلف (قالب‌های تهیه شده با بایندره‌های سرامیکی مختلف) ساخته شده و زبری سطحی نمونه‌ها بررسی شده است. قطعاتی که

¹ Viscous slip – viscous separation

از قالب‌های تهیه شده با بایندهای سُل سیلیکایی و هیدرولیسات‌ها تهیه شده‌اند کیفیت سطحی بالاتری نسبت به سدیم سیلیکات‌ها دارند. زیرا Na_2O موجود در سیلیکات سدیم می‌تواند با سیلیکا واکنش داده و ساختاری با دمای ذوب پایین از جمله $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ و $3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ تشکیل دهد. این ترکیبات با آلیاژ مذاب واکنش داده و باعث تخریب کیفیت سطحی قطعه می‌شود. پایداری حرارتی قالب‌های انجماد جهت دار به دلیل دمای کاری بالاتر و زمان نگهداری بیشتر باید از قالب‌های پلی کریستال بیشتر باشد [۲]. همانطور که بیان شد در لایه‌های اول این قالب‌ها از آلومینا استفاده می‌شود. زیرا پایداری حرارتی سیلیکات‌ها محدود به دمای ۱۵۵۰ درجه است و به دلیل ایجاد سیلان ویسکوز باعث کاهش استحکام قالب‌ها و حتی دفرمگی می‌شوند [۱۴]. بر اساس تحلیل‌های بیان شده در تحقیقات آقای ژلینگ ژو، قالب سرامیکی مورد استفاده برای ریخته‌گری دقیق سوپرآلیاژهای انجماد جهت دار باید شامل مقدار کافی مولایت ثانویه باشد تا از کاهش شدید ویسکوزیته فاز آمورف جلوگیری کند. افزودن اکسیدهای آلکالین مشخصاً باعث افزایش درصد فاز آمورف می‌شود. از طرفی، با افزایش دمای کلسینه کردن، مقدار فاز مولایت افزایش یافته است.

در شکل ۷، ریزساختار میکروسکوپی مورفولوژی سطح شکست برای نمونه‌های حاوی $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ نشان داده شده است. با زینتر شدن در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد، شروع تشکیل فاز شیشه‌ای در فصل مشترک‌ها مشخص است (بین ذرات دیرگداز در شکل ۷ الف و پ). ذرات استوکو از طریق فاز زمینه (دوغاب) و فاز شیشه ای به یکدیگر متصل شده‌اند. همانطور که در شکل ۷ ب و ت نشان داده شده است، با افزایش دمای کلسینه کردن، تشکیل فاز مولایت شروع شده است. این حالت، ذرات استوکو از طریق فاز شیشه‌ای و مولایت ثانویه تشکیل شده، به یکدیگر متصل متصل شده‌اند. افزودن اکسید آلکالین نقش مهمی در رفتار خزشی قالب‌های سرامیکی ایفا می‌کند. از یک سوی افزودن اکسید آلکالین باعث افزایش درصد فاز آمورف در فصل مشترک و کاهش ویسکوزیته فاز آمورف می‌شود و در نتیجه رفتار خزشی را بهبود می‌بخشد. از سویی دیگر، باعث افزایش درصد فاز مولایت می‌شود، و در نتیجه مکانیزم لغزش مرزخانه کنترل و محدود می‌شود [۱۴].



شکل ۷- تصویر SEM. الف) نمونه حاوی N_2O کلسینه شده در ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد. ب) کلسینه شده در ۱۳۵۰ درجه سانتی گراد. پ) نمونه حاوی K_2O کلسینه شده در ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد. ت) کلسینه شده در ۱۳۵۰ درجه سانتی گراد [۱۴].

۷-۲- نفوذپذیری گازی

در ریخته‌گری، مذاب آلیاژ با دمای بالا درون قالب سرامیکی ریخته می‌شود و زمان داده می‌شود تا خنک شود. درون قالب پر از

هوا است و باید این هوا با مذاب جابجا شود. هوای محبوس باید به سرعت از حفره قالب خارج شده و تخلخل و هوای محبوس درون قطعه ریخته‌گری ایجاد نشود، حباب‌ها و به طور جدی‌تر پر نشدن کامل قالب و ایجاد قسمت‌های ناقص در ریخته‌گری، ممکن است رخ دهد. چندین مکانیسم برای خروج هوای قالب وجود دارد؛

۱- جابجایی مستقیم با هوا در زمان ریخته‌گری

۲- جذب توسط آلیاژ

۳- خارج شدن از حفرات و تخلخل‌های باز قالب

نفوذپذیری قالب مهم‌ترین فاکتور است، بسیاری از قالب‌های ریخته‌گری تا ۳۰٪ تخلخل باز دارند. با افزایش تخلخل‌های راه به در نحوه پر شدن قالب با مذاب بهبود می‌یابد. نفوذپذیری در یک دمای مشخص مستقل از زمان است. این یک مزیت بزرگ برای ریخته‌گری است، یعنی افزایش نفوذپذیری باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری می‌شود [۱۵]. قبلاً هم بیان شد که به دلیل ایجاد عملیات حرارتی بر روی قالب‌های انجماد جهت دار و به دلیل سیلان سیلیکاتی، حفرات و گپ‌های قالب پر شده و در نتیجه می‌توان گفت که تخلخل قالب‌های انجماد جهت دار از قالب‌های پلی کریستال، بر یک نمونه مشابه بالاتر می‌باشد. که به دلیل ضخامت بیشتر این قالب‌ها، نفوذ پذیری کاهش می‌یابد [۷].

۳- بحث و نتایج

به عنوان جمع بندی، انتخاب صحیح مواد سرامیکی برای تولید قالب‌های سرامیکی یک نکته کلیدی است. اکسیدهایی نظیر زیرکون، آلومینا، سیلیکات آلومینا، سیلیکات زیرکونیوم، مولایت و سیلیکات آمورف مواد اصلی مورد استفاده در قالب‌های سرامیکی پخته‌ای می‌باشند. استوکو نیز معمولاً از سیلیکات آلومینا یا آلومینا انتخاب می‌شود. که از نظر اقتصادی بهترین گزینه هستند. زیرکون به دلیل ناخالصی‌هایی و استحاله فازی به ساختار مونوکلینیک معمولاً استحکام دمایی بالای قالب را کاهش می‌دهد، همچنین می‌تواند منجر به ایجاد ترک و یا تغییر ابعادی و شکل قالب سرامیکی شود. به همین دلایل ضروری است تا ذراتی دیگری به عنوان پایدارکننده زیرکونیای تتراگونال و یا معمولی^۱ به ترکیب اضافه شود تا از استحاله فازی جلوگیری شود. زیرکون به دلیل قیمت بالا در ساخت قالب ریخته‌گری جهت دار تک کریستال استفاده نمی‌شود.

دمای ذوب مولایت ۱۸۱۰ درجه سانتی‌گراد است، چگالی آن $3/05 \text{ g/cm}^3$ است، چگالی آن بستگی به دما ندارد. به دلیل ضریب انتقال حرارت پایین و ضریب انبساط دمایی کم، نسبت به شوک حرارتی و خزش بسیار مقاوم است. آلومینا تا حدی باعث اصلاح و کاهش تشکیل کریستوبالیت در فرآیند پخت می‌شود. درصد بالای آلومینا باعث کاهش مقاومت قالب در برابر شوک پذیری قالب‌ها می‌شود، اما مقاومت دمایی ترکیب کلی افزایش می‌یابد. مزیت بالای آلومینا قیمت مناسب و در دسترس بودن آن است. یکی از مزیت‌های بزرگ آلومینا عدم استحاله فازی و همچنین عدم نرم شدن در اثر افزایش دما است. همچنین در تماس با آلیاژهای خورنده نیز کمتر فعال است آلومینا در برابر سیلیکات زیرکونیوم به عنوان ماده ترجیحی برای فرآیند انجماد جهت‌دار استفاده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

پره‌های توربین انجماد جهت دار نسبت به پره‌های پلی کریستال در دماهای کاری بالاتری استفاده می‌شوند و سوپر آلیاژهایی با دمای ذوب بالاتری در این قالب‌ها ریخته‌گری می‌شوند. همچنین مدت زمان نگه داری مذاب در قالب سرامیکی در فرایندهای تولید پره‌های تک کریستال نسبت به گرید پلی کریستال بیشتر است. در نتیجه خواص قالب نیز بایستی متناسب با این شرایط کاری باشد. تحقیقات نشان داده است که برای تولید قالب‌های تک کریستال عملیات حرارتی در ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. زیرا در نمونه‌های عملیات حرارتی شده، درزهای کوچک پر و زینتر شده و ذرات درشت تر تشکیل می‌شود. استحکام فشاری قالب سرامیکی عملیات حرارتی شده در دمای اتاق افزایش می‌یابد.

¹ Regular

- از آلومینا به دلیل مقاومت بالاتر به سایش و استحکام بالاتر، عدم استحاله فازی و همچنین عدم نرم شدن در اثر افزایش دما در دوغاب لایه اول استفاده می‌شود. همچنین آلومینا در تماس با آلیاژهای خورنده نیز کمتر فعال است. به علت قیمت مناسب و در دسترس بودن، آلومینا در مقایسه با سیلیکات زیرکونیوم به عنوان ماده ترجیحی برای فرآیند انجماد جهت دار استفاده می‌شود.
- تخلخل قالب‌ها بایستی به حدی باشد تا در صورت خروج موم دچار ایجاد ترک و افت خواص قالب نشود. این مقدار در مراجع مختلف ۲۵-۳۰٪ گزارش شده است.
- دماهای بالاتر از ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و تنش اعمالی، خواص مکانیکی افت کرده و دلیل آن لغزش ویسکوز سیلیکا است. این رفتار یک دلیل اصلی برای خزش دمای بالای قالب‌های سرامیکی در حین انجماد جهت دار است.
- کوراندم به عنوان استوکو به ویژه در لایه اول استفاده می‌شود. کوراندم، پایدارترین حالت ترمودینامیکی آلوتروپیک آلومینا است که مقاومت بسیار خوبی در مقابل کسیدهای فلزی، محلول‌های اسیدی و بازی دارد، دانه‌های آن معمولاً نامنظم و با لبه‌های تیز است.

مراجع

- [۱] مهدی روشنی، سعید باغشاهی، حمید احمدمحرابی و علی جهان افروز، تاثیر افزودن الیاف نایلون بر ویسکوزیته دوغاب و استحکام قالب‌های سرامیکی در روش ریخته‌گری دقیق، اولین همایش بین‌المللی و ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، انجمن علمی ریخته‌گری ایران، ص ۱-۱۵، ۱۳۹۱
- [2] P.R. Beeley, R.F. Smart, Investment Casting, The Institute of Materials, London, UK, pp. 43-65, 1995
- [3] S. Jones, C. Yuan, Advances in shell moulding for investment casting, Journal of Materials Processing Technology, pp. 258-265, 2003
- [4] Wu HH, Li DC, Tang YP. Fabrication of integral core/shell ceramic casting mould for hollo w turbine blade, Appl Mech Mater Trans Tech Publ, 2013.
- [5] Krzysztof Kubiak, Dariusz Szeliga, Jan Sieniawski, The Unidirectional Crystallization of Metals and Alloys (Turbine Blades), Handbook of Crystal Growth, pp. 413-435, 2015
- [6] H Dong, H Dai, Single-Crystal Casting/Directional Solidification, University of Leicester, Leicester, UK, TWI Ltd, Cambridge, UK, pp. 89-108, 2014
- [7] Zilin Xu, Jiang wei Zhong, Xiang lin Su, Qingyan Xu, Baicheng Liu, Article Microstructure evolution and mechanical behaviors of alumina-based ceramic shell for directional solidification of turbine blades, pp. 1-11, 2018
- [8] Ekaterina Rzyankina, Numerical and experimental investigation of Directional Solidification in vacuum Investment Casting of Superalloys, Cape Peninsula University of Technology, pp. 30-40, 2013
- [9] D. Szeliga, K. Kubiak, M. Motyka, J. Sieniawski, Directional solidification of Ni-based superalloy castings: Thermal analysis, pp. 1-51, 2016
- [10] Defeng Liao, Zitian Fan, Wenming Jiang, Enqiang Shen, Dejun Liu, Study on the surface roughness of ceramic shells and castings in the ceramic shell casting process based on expandable pattern, Journal of Materials Processing Technology, pp. 1465-1470, 2011
- [11] Sarika Mishra, Rati Ranjana, Reverse Solidification Path Methodology for Dewaxing Ceramic Shells in Investment Casting Process, Materials and Manufacturing Processes, pp. 1385-1388, 2010
- [12] Fu Wang, Dexin Ma, Samuel Bogner, and Andres Buhrig-Polaczek, Comparative Investigation of the Downward and Upward Directionally Solidified Single-Crystal Blades of Superalloy CMSX-4, pp. 2376-2386, 2017
- [13] Atsushi Sato, Nickel-Based Single Crystal Superalloys for Industrial Gas Turbines, University of Birmingham, pp. 39-57, 2011
- [14] Yameng Wei, Zhigang Lua, Xin Guo, Influence of alkaline oxide on the deformation of ceramic shell mould at high temperatures during investment casting, pp. 1-8, 2018
- [15] Scott Simmonds, Formation and Avoidance of Surface Defects during Casting and Heat-Treatment of Single-Crystal Nickel-Based Superalloys, department of Engineering, university of Leicester, pp. 90-111, 2013
- [16] P. Carter, D.C. Cox, C.A. Gandin 1, R.C. Reed, Process modelling of grain selection during the solidification of single crystal superalloy castings, pp. 233-246, 1999.