فصل ششم

پخت سرامیک‌ها

هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل، از فراگیرنده انتظار می‌رود :

۱ــ مراحل پخت قطعه‌ی سرامیکی را در کوره نام ببرد.

۲ــ خشک شدن قطعه در مرحله‌ی پخت را توضیح دهد.

۳ــ سوختن و خروج مواد آلی از قطعه در مرحله‌ی پخت را شرح دهد.

۴ــ خروج کربنات‌ها و سولفات‌ها را از قطعه بیان کند.

۵ــ هم‌جوشی یا زینترینگ را توضیح دهد.

۶ــ تغییرات حجمی قطعه را در مراحل پخت نام ببرد.

۷ــ دلایل انبساط حجمی قطعه را در حین پخت توضیح دهد.

۸ــ دلایل انقباض حجمی قطعه را در حین پخت شرح دهد.

۹ــ عیوب قطعه در مرحله‌ی پخت را نام ببرد.

۱۰ــ دلایل دفرمگی قطعات را شرح دهد.

۱۱ــ انواع کوره‌های پخت را براساس نوع کار، تقسیم‌بندی کند.

۱۲ــ نحوه‌ی کار کوره‌های متناوب را شرح دهد.

۱۳ــ نحوه‌ی کار کوره‌های پیوسته را توضیح دهد.

۱۴ــ مزایا و محدودیت‌های کوره‌های متناوب و مداوم را مقایسه کند.

۱۵ــ سوخت کوره‌ها را نام ببرد.

۱۶ــ سوخت‌های جامد کوره‌ها را نام ببرد.

۱۷ــ سوخت‌های مایع کوره‌ها را نام ببرد.

۱۸ــ سوخت‌های گازی کوره‌ها را نام ببرد.

۱۹ــ کاربرد الکتریسیته یا منبع انرژی کوره‌ها را توضیح دهد.

مقدمه

قطعات سرامیکی پس از خشک شدن فاقد استحکام کافی‌اند و اگر کم‌ترین نیرویی به آن‌ها وارد آید خرد می‌شوند و درهم می‌شکنند. یا اگر مجدداً با رطوبت تماس پیدا کنند ممکن است دفرمه و یا تخریب شوند.

برای استحکام کافی باید آن‌ها را پخت کرد. معمولاً این عمل در دمای بالاتر از ۹۰۰°C انجام می‌شود. پخت قطعات سرامیکی بدون لعاب را «پخت بیسکویت» نامند.

اغلب سفال‌ها، دیرگدازها و محصولات بدون لعاب تنها یکبار پخت می‌شوند. در حالی که قطعات لعاب‌دار عموماً با دو پخت ساخته می‌شود در پخت بیسکویت قطعه برای حمل و نقل و لعاب‌زنی استحکام کافی پیدا می‌کند و پس از اعمال لعاب، پخت لعابی به منظور تأمین سطح شیشه‌ای انجام می‌گیرد.

در برخی از سرامیک‌ها، که نیاز به تزیین و دکور دارند، لازم است برای بار سوم و گاه بیش‌تر،آن‌ها را پخت نمود که به «پخت دکور» معروف است.

شایان ذکر است در محصولاتی که استحکام خشک مناسبی دارند ؛ مثل چینی‌های بهداشتی، پخت بدنه و لعاب به‌طور هم‌زمان انجام می‌گیرد. این نوع محصولات «تک‌پخت» نام گرفته‌اند.

بررسی تأثیرحرارت بر قطعه‌ی در حال پخت

قطعات پس از خشک شدن، برای استحکام موردنظر باید در کوره پخت شوند. تأثیر فرآیند پخت بر روی قطعات را در پنج محور می‌توان توضیح داد :

۱ــ خشک شدن کامل و خروج آب متبلور

قطعه پس از مرحله‌ی خشک شدن وارد کوره می‌شود. گرچه قطعه‌ها ظاهراً خشک به‌نظر می‌آیند، اما مقداری رطوبت در خود دارند و باید کاملاً خشک شوند. می‌دانیم هوای محیط همواره درصدی رطوبت دارد. بنابراین، اگر حتی قطعه‌ی خشک در هوای آزاد قرار گیرد، مقداری از رطوبت هوا را جذب می‌کند و آن را در تخلخل‌های خود به مایع تبدیل می‌نماید و این چنین مرطوب می‌شود.

از سوی دیگر در مرحله‌ی خشک کردن تمام آب‌های جذب شده نمی‌توانند در آن دما از قطعه خارج شوند. در ضمن، آب شیمیایی یا تبلور تا دمای بالاتر از ۴۰۰°C در قطعه باقی خواهد بود.

بنابراین، در اولین مرحله‌ی پخت، ضروری است قطعه از رطوبت‌های مذکور کاملاً عاری

شود. البته باید توجه داشت این عمل با کم‌ترین سرعت و به آرامی صورت گیرد تا احتمال بروز عیوب در قطعه به حداقل رسد. در این مرحله، به دلیل شکسته شدن پیوند OH (آب تبلور) استحکام قطعه کاهش می‌یابد و خروج سریع آب به صورت بخار می‌تواند حتی با تخریب قطعه همراه باشد.

پس لازم است زمان مرحله‌ی اول پخت، طولانی باشد و به تدریج از سرعت افزایش دما در کوره کاسته شود تا به هنگام خشک شدن سلامت قطعه حفظ شود.

۲ــ سوختن و خروج ناخالصی‌های آلی از قطعه

مواد اولیه‌ی سرامیکی حاوی ناخالصی‌های فراوان است، از جمله ناخالصی‌های آلی در رس‌ها و چسب‌ها یا بیندرها. این مواد در دمای حدود $750^{\circ}C$ با اکسیژن اتمسفر کوره ترکیب می‌شوند و می‌سوزند و از قطعه خارج می‌شوند.[1]

خروج این مواد از قطعه همراه با تخلخل است ؛ ضمن آن که عدم خروج کامل آن باعث بروز عیوب رنگی در قطعه می‌گردد. همان‌طور که گفته شد خروج آب تبلور، استحکام قطعه را کاهش می‌دهد و در آن تخلخل‌هایی ایجاد می‌نماید. با خروج مواد آلی باز هم حجم تخلخل افزایش می‌یابد در حالی که استحکام قطعه بسیار پایین است.

۳ــ خروج کربنات‌ها و سولفات‌ها از قطعه

پس از مرحله‌ی خروج مواد آلی،خروج کربنات‌ها و سولفات‌ها آغاز می‌گردد. واکنش تجزیه‌ی کربنات‌ها از دمای $400^{\circ}C$ شروع می‌شود :

$$MgCO_3 \xrightarrow{408^{\circ}C} MgO + CO_2 \uparrow$$

دمای تجزیه‌ی کربنات‌ها عموماً همان دمای تجزیه‌ی کربنات کلسیم در نظر گرفته می‌شود.

$$CaCO_3 \xrightarrow{894^{\circ}C} CaO + CO_2 \uparrow$$

واکنش تجزیه‌ی کربنات کلسیم در حدود دمای $900^{\circ}C$ انجام می‌شود، اما دمای عملی واکنش، به اتمسفر، شکل، اندازه و ذرات بستگی دارد. بنابراین، ممکن است واکنش از دمای پایین‌تر از آن‌چه گفته شد، آغاز شود. یا آن که در دمای بالاتر از $1000^{\circ}C$ ، نیز ادامه یابد.

سولفات‌ها نیز در دمای اندکی بالاتر از قطعه خارج می‌گردد، اما عموماً مقدار آن‌ها در

۱ــ باید اتمسفر کوره تا دمای $700^{\circ}C$ حاوی اکسیژن لازم باشد (محیط اکسیدی)

اغلب بدنه‌های سنتی کم است و کم‌تر نیز به آن توجه می‌شود، ولی وجود سولفات بیش‌تر سبب بروز عیب در بدنه خواهد شد.

۴ــ هم‌جوشی و یک‌پارچگی قطعه یا زینترینگ

در مراحل قبلی بحث تجزیه و خروج مواد از قطعه ملاحظه شده از جمله این که قطعه‌ای متخلخل با استحکام کم حاصل شد. اما در این مرحله با افزایش دما، ذرات ریز در دمایی پایین‌تر از «نقطه‌ی ذوب» و در مجاورت مواد کمک ذوب می‌توانند با یک‌دیگر جوش بخورند و به عبارت دیگر دو ذره‌ی جامد در محل اتصال با یک‌دیگر به دلایل مختلف، از قبیل «افزایش دما، فشار و تغییر انرژی و ذوب سطحی» پیوند برقرار کنند. در چنین شرایطی، هم‌جوشی با پیشرفت زمان رشد می‌کند و به سبب متراکم شدن ذرات، حجم کلی قطعه کاهش می‌یابد و از میزان تخلخل‌های قطعه کاسته می‌شود؛ درنتیجه دانسیته قطعه افزایش می‌یابد.

اما باید دانست هم‌جوشی ممکن است با تولید فاز مایع همراه باشد. توضیح این که گدازآورهای موجود در فرمولاسیون بدنه، تدریج نرم و سپس ذوب می‌شوند و آن‌گاه فاز یا فاز مایع شیشه‌ای را تولید می‌نمایند.

به‌طور کلی فاز مایع با نفوذ به محل‌های خالی قطعه می‌تواند تا ۹۰٪ کل حجم قطعه باشد، البته همین مقدار فاز مایع سبب پر شدن خلل و منافذ قطعه خواهد شد؛ بنابراین، پس از این مرحله با کاهش حجم قطعه و افزایش استحکام آن روبه‌رو می‌شویم، زیرا در پایان مرحله‌ی هم‌جوشی (زینترینگ یا زینتر شدن) ذرات کاملاً به‌یک‌دیگر متصل و یک‌پارچه می‌گردند و بسیاری از تخلخل‌ها پر می‌شود.

در مراحل پایان پخت، انقباض پدید می‌آید و حجم قطعه کاهش می‌یابد، ضمن این که یک‌پارچگی و تراکم، استحکام آن را افزایش می‌دهد.

۵ــ استحاله‌های فازی[۱]

با حرارت دادن در مواد ، استحاله یا تغییر فاز مشاهده می‌شود. این استحاله و تغییر وتحول فازی در مواد گاه با تغییرات حجمی نسبتاً زیادی همراه است. این تغییرات اگر کنترل شده نباشد بسیار مخرب خواهد بود. به عنوان مثال در میان مواد موجود در آمیزهای سرامیکی، سیلیس دارای دو استحاله‌ی فازی است که در دمای محدوده‌ی پخت صورت می‌گیرد؛ از این‌رو، آشنایی با این استحاله‌ها (کوارتز و کریستوبالیت) بسیار مهم است.

۱ــ تغییر، تحول و تبدیل ساختمانی هر ماده از شکلی به شکل دیگر، در دمای مختلف، «استحاله» نام دارد.

سیلیس از اصلی‌ترین مواد اولیه در فرمولاسیون بدنه‌های سرامیکی به‌شمار می‌آید. در کتاب «مواد اولیه» با این ماده و مدیفیکاسیون‌های آن آشنا شدید.

کوارتز پایدارترین و فراوان‌ترین شکل سیلیس در حالت طبیعی است و در فرمولاسیون آمیز نیز دارای درصد بیش‌تری است.

کوارتز دارای دو شکل «کوارتز آلفا» و «کوارتز بتا» است. در دمای محیط و حالت پایدار فاز آلفا پایدار است .کوارتز آلفا در دماهای بالا به فاز بتا تبدیل می‌گردد. اگر کوارتز آزاد در فرمولاسیون آمیز وجود داشته باشد در حین فرآیند پخت با افزایش دما، قابلیت استحاله‌ی فازی α به β ایجاد خواهد شد و در دماهای $573^{\circ}C$ کوارتز آزاد از فاز α به β تبدیل می‌گردد. این تغییر به‌صورت چرخش ساختمانی است و با تغییرات و انبساط حجمی زیادی همراه است.[1] اگر سرعت افزایش دما کنترل نشود و تغییرات به آرامی صورت نگیرد، هم‌چنین مقدار کوارتز آزاد در بدنه زیاد باشد، انبساط حجمی ایجاد شده در قطعه زیاد و سریع خواهد بود ؛ در نتیجه سبب ترک و شکست در قطعه می‌شود.

از سوی دیگر، این استحاله به‌صورت برگشت‌پذیر (جابه‌جاساز) صورت می‌گیرد ؛ یعنی به دلیل افزایش دما و انرژی در قطعه، طول پیوند و زاویه‌ی اتم‌های سازنده‌ی قطعه نسبت به یک‌دیگر تغییر می‌کند و چرخشی در قطعه حاصل می‌شود. درنتیجه حجم قطعه تغییر می‌یابد. اما چون این استحاله با تغییر شکل شبکه (تخریب شبکه و بازسازی آن) همراه نیست، با کاهش دما اتم‌ها به حالت اولیه باز می‌گردند ؛ از این‌رو، این استحاله‌ها را برگشت‌پذیر می‌نامند.

بنابراین، باید توجه داشت بعد از مرحله‌ی پخت اگر کوارتز آزاد در قطعه باقی مانده باشد در حین فرآیند سرد کردن قطعه و در دمای $573^{\circ}C$ قابلیت تبدیل فاز β به α خواهد بود و اگر این استحاله صورت گیرد، همان‌گونه که در حالت اول با افزایش حجم همراه بود، در این مرحله، کاهش حجمی قطعه پدیدار می‌شود ؛ بنابراین، ضروری است سرعت کاهش دمای قطعه، با کنترل دقیقی صورت بگیرد تا امکان بروز عیب در قطعه به حداقل برسد.

استحاله‌های متفاوتی حین پخت در سرامیک‌ها روی می‌دهد که آشنایی با آن‌ها می‌تواند ما را در تنظیم و ارائه‌ی یک برنامه پخت مطلوب راهنمایی کند.

بررسی تغییرات حجمی قطعه در حین پخت

در فرآیند پخت، حجم و ابعاد قطعه در اثر حرارت، تغییرات زیادی می‌کند. بطورکلی ابعاد

۱ــ حدود ۲/۴٪

نهایی قطعات سرامیکی پس از پخت کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که می‌دانیم مواد در اثر حرارت، انبساط می‌یابند. در حقیقت کلیه‌ی ذرات سرامیکی در یک قطعه در اثر حرارت منبسط می‌شوند (انبساط حرارتی). اما انقباض کلی به‌دلیل تشکیل فاز مذاب و پرکردن تخلخل‌ها، بسیار بیش‌تر از انبساط حرارتی ذرات است. با کاهش دما انبساط حرارتی برگشت پذیر می‌شود، اما انقباض ناشی از پخت سرامیک‌ها بازگشت‌ناپذیر است. انقباض پخت در زبان انگلیسی شرینکیج به معنای «آب رفتگی» یا «درهم فرو رفتن» نام گرفته است و در کارخانجات تولیدی هم از این عبارت استفاده می‌شود.

با توجه به کوچک بودن انبساط حرارتی در مقایسه با انقباض سرامیک‌ها حین پخت محصولات متداول سرامیکی، می‌توان از انبساط حرارتی چشم‌پوشی کرد ولی در ساخت سرامیک‌های پیشرفته و مهندسی که اندازه و ابعاد محصول اهمیت زیادی دارند باید مورد توجه بیش‌تری قرار گیرد.

انقباض پخت

اگر بار دیگر به مرحله‌ی خشک کردن قطعه نظری بیفکنیم، در خواهیم یافت انقباض از تر به خشک از ابتدای فرآیند خشک شدن آغاز می‌شود و تا مرحله‌ی لدرهارد ادامه می‌یابد و در مراحل پایانی خشک شدن، انقباض محسوس در قطعه صورت نمی‌گیرد.

اما در مرحله‌ی پخت با شروع فرآیند هم‌جوشی (زینترینگ) انقباض افزایش می‌یابد تا مراحل پایانی پخت، کاهش حجم قطعه صورت می‌گیرد. همان‌گونه که گفته شد، با افزایش دما و تولید فاز مایع ذرات درهم فرومی‌روند و به یک‌دیگر متصل می‌گردند ؛ هم‌چنین با فاز مایع، تخلخل‌ها پرمی‌شوند. براثر در هم فرورفتن ذرات و پرشدن خُلَل و منافذ، حجم کلی قطعه منقبض می‌شود.

آن‌چه در این انقباض بسیار مهم است عدم تناسب در زمان کاهش ابعاد قطعه و زمان کاهش وزن آن است. همان‌گونه که گفته شد، در مراحل اولیه با خروجی مواد فرّار، کاهش وزن قطعه رخ می‌دهد و انقباض محسوسی صورت نمی‌گیرد، اما در مرحله‌ی آخر پخت با پیشرفت زینترینگ، تخلخل‌ها پرتر و قطعه کوچک‌تر می‌شود.

بررسی عیوب قطعه در مرحله‌ی پخت

اگر انبساط یا انقباض حجمی به آرامی و کنترل شده صورت نگیرد یا این تغییرات به صورت یک‌نواخت در قطعه رخ ندهد، با عیوب مختلفی مانند تاب ، ترک یا دفرمگی در قطعات مواجه خواهیم شد.

مهم‌ترین عوامل تاب در قطعات

یک‌نواختی انتقال حرارت: پیش از این گفته شد اگر تغییرات حجمی یک‌نواخت نباشد قطعه دچار تنش و شوک می‌شود. برای مثال یک قوری چینی (پرسلان) را درنظر بگیرید، اگر آن را برروی اجاق گاز قرار دهید چه اتفاقی رخ خواهد داد؟ چرا؟

این اتفاق در کوره نیز ممکن است رخ دهد. اگر انتقال حرارت به‌طور یک‌نواخت صورت نگیرد، یک طرف قطعه نسبت به طرف دیگر آن گرم‌تر می‌شود و انقباض در دو سمت قطعه نیز متفاوت می‌گردد. درنتیجه در قطعه شوک حرارتی ایجاد می‌شود و ممکن است بیش از توانایی تحمل قطعه باشد، و باعث ترک و شکست قطعه می‌شود. در این حالت قوری بر روی اجاق خواهد شکست.

نحوه‌ی چیدن قطعات در کوره

اگر قطعات بر کف کوره چیده شوند سطح زیرین قطعه (پایه‌ی ظرف) نسبت به دیگر سطوح قابلیت تحرک کم‌تری خواهد داشت. این سطح، هم وزن قطعه را متحمل شده است و هم بر روی سطحی قرار دارد که با تغییرات دما تقریباً هیچ انقباضی ندارد ؛ از این‌رو سبب انقباض کم‌تر پایه‌ی قطعه خواهد شد. پس در قسمت فوقانی قطعه، انقباض بیش‌تر و در سطح زیرین آن انقباض کم‌تر است. در صورت بروز انقباض غیر یک‌نواخت ممکن است در قطعه دفرمگی ایجاد شود، اما اگر این قطعه بر روی سطحی (صفحه‌ای) پخت نشده ازجنس خود، قرار گیرد در حین مراحل پخت، قطعه همراه با صفحه‌ی زیرین خود منقبض و منبسط می‌گردد ؛ در نتیجه، انقباضِ غیریک‌نواخت، در قطعه به‌وجود نخواهد آمد و عیوب در قطعه ایجاد نخواهد شد.

قطعات مدور توخالی، مانند فنجان در اثر انقباض پخت ممکن است شکل یک‌نواخت را از دست بدهند. برای جلوگیری از این دفرمگی باید از دیسک‌های سرامیکی بر روی فنجان استفاده کرد. البته می‌توان فنجان‌ها را دوبه‌دو برروی هم قرار داد تا به‌صورت یک‌نواخت پخت گردند و شکل مدور خود را حفظ نمایند (شکل۱ـ۶).

شکل ۱ـ۶

بایستی توجه داشت تمامی عیوب مشاهده شده پس از پخت ممکن است مربوط به این مرحله نباشند. در حقیقت بسیاری از تَرَک‌های ریز و عیوب به‌وجود آمده در مرحله‌ی شکل دادن یا خشک‌کردن، در مرحله پخت خود را نشان می دهند.

برای رفع یا کنترل عیوب محصولات سرامیکی پس از پخت لازم است تا هم در مراحل قبلی دقت کافی اعمال شود و هم برنامه ی پخت متناسب با تحولات درونی محصول به طور صحیح طراحی و اجرا کرد.

برنامه یا منحنی پخت

دانستیم با کنترل سرعت تغییرات حجمی در قطعه ، عیوب کم‌تری را به وجود می‌آید ؛ از این رو برای کنترل سرعت تغییرات باید درجه حرارت را کنترل کرد.

انتخاب سرعت مناسب برای تغییرات درجه‌ی حرارت ــ به‌منظور جلوگیری از بروز عیوب در قطعه ــ الزامی است و اگر رابطه‌ی صحیح زمان و تغییرات درجه‌ی حرارت، در طول مرحله‌ی پخت، برقرار نباشد خطر معیوب شدن قطعات، همواره وجود خواهد داشت.

خروج نامناسب آب شیمیایی، نیازمند کنترل سرعت افزایش دما در کوره است تا به آرامی این آب از قطعه خارج گردد و قطعه تخریب نشود. در دمای مختلف استحاله‌های فازی رخ می‌دهد و تغییرات حجمی زیادی را در قطعه ایجاد می‌کند. برای جلوگیری از تخریب قطعه باید سرعت این استحاله‌ها را کنترل کرد. به هنگام فرآیند پخت، مواد آلی با اکسیژن درون کوره ترکیب می‌گردد و می‌سوزد ؛ در نتیجه، واکنش گرمازا ایجاد می‌شود و افزایش دما را سرعت می‌بخشد. به همین سبب، این افزایش دما باید کنترل شود.

همان‌گونه که ملاحظه شد، در مراحل مختلف پخت، برای افزایش دما در واحد زمان، به برنامه‌ای نیاز داریم که به آن «برنامه‌ی پخت» یا «منحنی پخت» گویند. انتخاب درست و صحیح این برنامه موجب کاهش بروز عیوب در قطعه در حین مراحل پخت خواهد شد. برنامه‌ی پخت براساس نوع بدنه، نحوه‌ی آماده‌سازی و شیوه‌ی شکل‌دهی قطعه، نوع، حجم و امکانات کوره و نظایر آن تهیه می‌گردد. در صفحه‌ی ۱۲۳ یک منحنی (برنامه) پخت مشاهده می‌شود.

انواع کوره‌های پخت صنایع سرامیک

کوره‌های پخت صنایع سرامیک دارای محیط بسته‌ای هستند و با محیط اطراف، از نظر حرارتی کاملاً ایزوله شده‌اند. به عبارت دیگر، انتقال حرارت از داخل به خارج و به عکس، به حداقل

ممکن می‌رسد تا فرآورده‌های سرامیکی در درون این محیط چیده شوند و با افزایش دما پخت گردند.

برای این منظور جداره‌ی کوره‌های سرامیکی از مواد دیرگداز ساخته شده‌اند تا در برابر درجه‌ی حرارت بالا مقاومت بیش‌تری داشته باشند. کوره‌های صنایع سرامیک از لحاظ نوع کار، دمای پخت، و نوع سوخت، حرارت‌دهی، نوع قطعات در حال پخت و همانند آن، متفاوت‌اند و براساس این تفاوت‌ها تقسیم‌بندی شده‌اند.

کوره‌های پخت سرامیک براساس «نوع کار» بر دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند : «کوره‌های متناوب» و «کوره‌های پیوسته». از سوی دیگر بسته به زمان پخت کوره‌ها به دو نوع کوره‌های متداول و کوره‌های پخت سریع طبقه‌بندی می‌شوند.

کوره‌های متناوب

کوره‌های متناوب یا غیرمداوم، اتاقک بسته‌ای است که با توجه به کاربرد آن دارای ابعاد مختلف است. این کوره‌ها به صورت تناوبی (غیرمداوم) کار می‌کنند و مراحل کار با آن‌ها را می‌توان به پنج قسمت تقسیم‌بندی کرد :

۱ــ قطعات در کوره‌ی سرد چیده می‌شوند.

۲ــ کوره روشن می‌شود و قطعات تا دمای پخت گرم می‌شوند.

۳ــ درصورت نیاز تا زمان مشخص در آن دما می‌مانند.

۴ــ کوره خاموش و سرد می‌شود.

۵ــ قطعات پخت شده پس از خنک شدن (دمای محیط) تخلیه می‌گردند.

در آغاز، کوره‌های سرامیکی متناوب سردند و باید سوخت زیادی مصرف شود تا گرم شوند. پس از رسیدن به دمای مورد نیاز، مجدداً کوره‌ها سرد و قطعات خارج می‌شوند. ملاحظه می‌کنید در این روش برای هر بار پخت، انرژی زیادی مصرف می‌شود و با سرد کردن کوره انرژی بسیاری تلف می‌گردد. اما از سوی دیگر، ابعاد و حجم کوره، قیمت پایین و سادگی ساختمان آن سبب گردیده است تا هنوز این کوره‌ها در کارخانجات و کارگاه‌های کوچک کاربرد فراوانی داشته باشند.

در صفحه‌ی بعد تصاویری از کوره‌های متناوب نشان داده شده است.

شکل ۲ــ۶ــ کوره‌های جعبه‌ای، در این کوره دیواره‌ها جابه‌جا شده بالا و پایین می‌رود.

شکل ۳ــ۶ــ کوره‌ی پخت دیرگدازهای سرامیکی (واگنی) درب ورودی به وسیله‌ی دو عدد سیم بکسل بالا و پایین می‌شود.

کوره‌های پیوسته: روشن و خاموش شدن متناوب کوره‌ها، اتلاف انرژی بسیاری را در پی داشت، بنابراین، مهندسان به فکر ساخت و طراحی کوره‌هایی افتادند که اتلاف انرژی در آن به حداقل برسد و همواره کوره روشن باشد.

برای این منظور، مهندسی آلمانی به نام «هوفمن»[۱] در سال ۱۸۵۶ میلادی کوره‌ای را طراحی کرده که به نام خود او به «کوره‌ی هوفمن» مشهور گردید.

کوره‌های هوفمن براساس جلوگیری از اتلاف حرارتی طراحی گردیده بود. آن‌ها از چند کوره‌ی متناوب (محفظه‌ی پخت) به‌صورت زنجیره‌ای درکنار یک‌دیگر طراحی شده بودند و در نتیجه، مجموعه‌ای بسته را در کنار هم ایجاد می‌کردند. این کوره‌ها را به‌گونه‌ای در مجاورت یک‌دیگر قرار می‌دادند تا فضای داخلی آن‌ها با یک‌دیگر مرتبط گردد و جریان هوای درونی آن‌ها به راحتی به دیگر محفظه‌ها انتقال یابد.

در کوره‌های هوفمن روند فرآیند پخت به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌گردید تا اگر این کوره دارای چهار محفظه باشد،[۲] اولین محفظه در مرحله‌ی سرد شدن قرار گیرد ؛ محفظه‌ی دوم در حال گرم شدن باشد و از حرارت اتلافی محفظه‌ی اول که در حال سرد شدن است استفاده نماید ؛ محفظه‌ی سوم

۱ــ Friedrich Hoffmann

۲ــ محفظه‌ی پخت از سه واگن هم‌اندازه ساخته شده است.

بالاترین دما رابرای پخت قطعات درون خود دارا باشد. محفظه‌ی چهارم در حال تخلیه و بارگیری قرار گیرد. بدین ترتیب، در این کوره‌ها اتلاف حرارتی در مقایسه با کوره‌های متناوب، کم‌تر است. قطعات در کوره‌های هوفمن ثابت است و جریان حرارتی (شعله‌ای) از یک اتاقک به اتاقک دیگر پی‌درپی در حرکت است و درون محفظه‌های پخت جریان دارد ؛ از این‌رو، با سرد شدن یک محفظه (محفظه‌ی پخت) حرارت هدر نمی‌رود و حرارت اضافی به محفظه بعدی منتقل می‌شود بنابراین اتلاف حرارتی کم‌تری صورت می‌گیرد. اما این نکته را نباید از یاد برد، قطعاتی که درون این کوره‌ها پخت می‌شوند باید در برابر شوک حرارتی تحمل بالایی داشته باشند، زیرا با جریان هوا در کوره، شیب حرارتی زیادی به‌وجود می‌آید و قطعات را با شوک حرارتی روبه‌رو می‌کند، بنابراین، از آن‌ها کم‌تر برای پخت قطعات ظریف سرامیکی استفاده می‌شود و اغلب برای کوره‌های آجرپزی به‌کار گرفته می‌شوند.

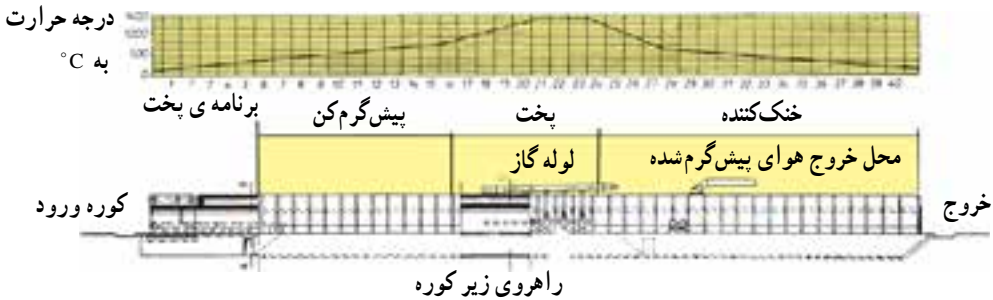
برای برطرف ساختن کاستی‌های کوره‌های هوفمن، کوره‌هایی طراحی و ساخته شد که شکلی همانند تونل دارد و از این‌رو به «کوره‌های تونلی» مشهور شده است. در کوره‌های تونلی محصولات و قطعات سرامیکی بر روی واگن قرار می‌گیرند و در محفظه‌ی کوره حرکت می‌کنند، بنابراین، کوره‌های تونلی دارای طول و حجم بزرگی بودند. کوره‌های تونلی با درنظر گرفتن سه منطقه طراحی شده است تا قطعه به آرامی «گرم»، «پخت» و «سرد» گردد و تغییرات حرارتی بر روی قطعات به آرامی صورت گیرد ؛ هم‌چنین کم‌ترین شوک و تنش در آن‌ها ایجاد گردد تا از احتمال بروز عیوب در قطعات کاسته شود. در منطقه‌ی اولیه‌ی کوره، قطعات به آرامی گرم می‌شوند و کاملاً خشک می‌گردند تا از این طریق، تنش‌ها و عیوبی که در مباحث قبل بیان گردید، در قطعات ایجاد نگردد. این قسمت از کوره به نام منطقه‌ی «پیش‌گرم کن» کوره معروف است. در «پیش گرم‌کن» قطعات قبل از پخت، گرم و خشک می‌شوند و سپس وارد منطقه‌ی دوم کوره می‌گردند.

قطعات در منطقه‌ی دوم به حرکت در می‌آیند و با پیش‌روی درمنطقه‌ی پخت، دمای آن‌ها افزایش می‌یابد تا به حداکثر دمای مورد نیاز پخت برسند[1]، سپس در ادامه‌ی پیش‌روی قطعه در کوره، دما کاهش می‌یابد و قطعات وارد منطقه‌ی سوم می‌شوند. در منطقه‌ی خنک کننده دمای قطعات به آرامی کاهش می‌یابد تا در هنگام خروج قطعه، اختلاف دمای قطعه و محیط بیرون باعث بروز عیب در آن‌ها نگردد. کوره‌های تونلی به‌گونه‌ای طراحی گردیده‌اند که هوا از منطقه‌ی خنک‌کننده بر قطعه وزیده می‌شود و این جریان هوا وارد منطقه‌ی پخت شده‌ی گرم می‌گردد و با ورود هوای گرم در

۱ــ منطقه‌ای از کوره که دارای بالاترین دماست به «جهنم کوره» معروف است.

منطقه‌ی «پیش‌گرم» آن قسمت ازکوره را نیزگرم می‌کند. بنابراین در کوره‌های تونلی از جریان هوا به بهترین نحو ممکن استفاده می‌شود تا از حرارت کوره، بیش‌ترین بهره عاید گردد و اتلاف حرارتی به حداقل خود برسد.

در شکل ۴ــ۶ سه منطقه از کوره‌ی تونلی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴ــ۶

کوره‌های تونلی در مقایسه با کوره‌های متناوب، بازده حرارتی بیش‌تری دارند، اما احداث و ساخت آن‌ها پر هزینه است و فضای بیش‌تری را اشغال می‌کند.[۱] البته باید کوره‌های تونلی در طول شبانه‌روز روشن باشد زیرا روشن و خاموش کردن متناوب آن‌ها، هزینه‌ی بالایی دربرخواهد داشت. زمان طولانی پخت که تا سه روز نیز می‌انجامد از عیوب اصلی این کوره‌ها به‌شمار می‌آید.

شکل ۵ــ۶

۱ــ طول کوره‌های تونلی متداول حدود ۸۰ متر است و طول انواع قدیمی آن‌ها به ۲۱۰ متر نیز می‌رسید.

بنابراین، لازم بود عیوب از در کوره‌های تونلی برطرف شود. متعاقباً طراحی کوره‌هایی با طول و حجم کم‌تر کاستی‌های موجود در کوره‌های تونلی را برطرف ساخت. در این کوره‌ها دیگر واگن وجود ندارد، بلکه قطعات بر روی غلتک (رولر) از جنس سرامیک‌های دیرگداز قرار می‌گیرند و با چرخش آن‌ها قطعات درون کوره پیش می‌روند. زمان پخت در کوره‌های جدید بسیار کم شده است ؛ از این‌رو، این کوره‌ها با نام «کوره‌های پخت سریع» مشهورند. قطعات در کوره‌های پخت سریع مانند کاشی، کم‌تر از یک ساعت پخت می‌شوند و از کوره خارج می‌گردند. برای پیشرفت و اصلاح و تکمیل کوره‌های پخت سریع، تلاش فراوانی صورت گرفته است تا جایی که به پخت فوق‌العاده سریع قطعات (در حدود ۱۵تا ۲۵دقیقه) نیز دست یافتند (کوره‌های مایکروویو).

سوخت کوره‌ها

یکی از عوامل تفکیک و تقسیم‌بندی کوره‌ها، براساس نوع سوخت مصرفی آن‌هاست.
انرژی حرارتی کوره‌ها با استفاده از سوخت‌های جامد، مایع و گاز یا الکتریسیته تأمین می‌شود.

سوخت‌های جامد

منابع تولید انرژی سوخت‌های جامد عبارت‌اند از : کک و آنتراسیت، زغال سنگ‌قهوه‌ای (لیگنیت) و تورب، چوب و زغال چوب. با سوختن این مواد در کوره‌ها، انرژی زیادی حاصل می‌شود و از آن جهت پخت قطعات سرامیکی استفاده می‌گردد. شایان ذکر است در کوره‌های سنتی استفاده از سوخت جامد مرسوم بوده است و به دلایل مختلف از قبیل :

۱ــ تولید رطوبت در حین پخت (چوب)،
۲ــ گران و پرهزینه بودن (کک در مقایسه با چوب و زغال)،
۳ــ ذخایر کم در کشورهای صنعتی (زغال سنگ و چوب)،
۴ــ تولید خاکستر در محیط کوره،
۵ــ تولید گازهای مزاحم در اتمسفر کوره و تغییر خواص قطعات سرامیکی و نسوزهای کوره،

این مواد به‌عنوان منابع تولید انرژی کم‌تر استفاده می‌شود و مصرف آن‌ها، به‌عنوان ماده‌ی سوختنی، در کوره‌های نوین محدود شده است.

جدول ۱ــ۶ ارزش گرمادهی سوخت‌های جامد را نشان داده است.

جدول ۱ــ۶

ماده‌ی سوختی	ارزش حرارتی $\frac{kj}{kg}$
چوب	۱۸۸۵۰
تورب	۲۳۹۰۰
زغال سنگ قهوه‌ای	۲۵۵۵۰
آنتراسیت	۳۳۵۰۰
کک	۳۳۹۰۰

سوخت‌های مایع

مایعات اشتعال‌پذیر که غالباً ریشه‌ی آلی دارند و حاوی هیدروکربن‌های حاصل از نفت خام‌اند سوخت‌های مناسبی در صنایع پخت سرامیک به‌شمار می‌آیند.

نفت سفید، گازوییل و نفت کوره (مازوت) از مایعات مهم سوختنی هستند که با سوختن در کوره‌های صنایع سرامیکی انرژی مورد نیاز پخت قطعات را تأمین می‌کنند.

ذخایر ناکافی، گران بودن و تولید گاز با سولفور مزاحم در اتمسفر کوره، مهم‌ترین عواملی هستند که مصرف این مواد را محدود ساخته است، اما این مواد در کشورهای دارای ذخایر نفتی یکی از منابع اصلی سوخت به‌شمار می‌آید و در کارگاه‌های کوچک به‌کار گرفته می‌شوند.

چون ترکیبات نفت، که مواد سوختی از آن‌ها به‌دست می‌آید متفاوت است، خصوصیات انرژی‌دهی مواد سوختنی نیز با یک‌دیگر متفاوت‌اند ؛ بنابراین، نمی‌توان عددی ثابت برای ارزش گرمادهی هر یک از سوخت‌ها ارائه داد ؛ با این همه، تمامی انواع آن‌ها (سوخت‌های مایع) دارای ارزش حرارتی در محدوده‌ی $۴۲۰۰۰ - ۴۳۰۰۰ \frac{kj}{kg}$ هستند.

سوخت‌های گازی

گازها رایج‌ترین و متداول‌ترین سوخت‌ها در پخت صنایع سرامیکی‌اند. استفاده از این مواد سوختی هزینه‌های تولید را کاهش داده، به دلیل عدم تولید خاکستر و گازهای مضر، مانند گوگرد، کیفیت محصولات را بالا برده است. گازهای طبیعی، مایع، گازهای کوره بلند، گاز زغال‌سنگ و گاز آب از گازهای مهم سوختنی هستند که در صنایع سرامیکی کاربرد دارند. کشور ایران، دومین کشور

دارنده‌ی منابع و ذخایر گازی در دنیاست ؛ از این‌رو این ماده سوختی بهترین سوخت کوره‌های پیش‌رفته‌ی پخت سرامیک محسوب می‌شود که درکشور ما رایج است.

رایج‌ترین گازهای مصرفی در کوره‌ها

رایج‌ترین گازهای مورد مصرف، هیدروکربن‌ها (پروپان و بوتان) هستند که از نفت یا به صورت طبیعی به‌دست می‌آیند. این مواد به راحتی در حرارت و فشار معین[1] مایع می‌شوند و مجدداً درحین سوختن به راحتی به گاز تبدیل می‌گردند. پس حمل و نقل آن‌ها به راحتی صورت می‌گیرد ؛ هم‌چنین استفاده و احتراق آن‌ها در کوره‌ها به سهولت انجام می‌پذیرد. از سوی دیگر، از سوختن آن‌ها انرژی حرارتی بسیار بالا تولید می‌شود.

جدول ۲ــ۶ــ ارزش حرارتی سوخت‌های گازی

نام سوخت	ارزش گرمادهی $K\frac{cal}{m}$
گاز آب	>۲۶۷۰
گاز زغال سنگ	۴۴۵۰
گاز طبیعی	>۱۴۲۴۰
گاز پروپان خالص	≅ ۲۴۲۴۰
گاز بوتان خالص	≅ ۳۰۵۰۰

الکتریسیته

الکتریسیته نیز یکی از منابع مهم تولید انرژی برای کوره‌های پخت سرامیکی به‌شمار می‌آید. کوره‌های الکتریکی انرژی حرارتی بالایی را ایجاد می‌کنند و بازده حرارتی بسیار بالایی دارند. انرژی حرارتی تولید شده، از طریق جریان برق در المان‌ها، حرارت ایجاد می‌کند و همانند اجاق‌های برقی دارای المان‌های حرارتی است به طوری که در برابر جریان الکتریکی از خود مقاومت نشان می‌دهد و این مقاومت سبب تولید گرما می‌گردد.

کوره‌ی الکتریکی در مقایسه با اجاق‌های برقی دارای المان‌های حرارتی بیش‌تر و قوی‌تری است ؛ از این‌رو، الکتریسیته بیش‌تری مصرف می‌کند.

۱ــ دارای فشار و دمای بحرانی پایینی هستند.

بنابراین، هزینه‌ی تأمین انرژی کوره‌ی الکتریکی بسیار بالاست و قیمت محصولاتی که در این کوره‌ها پخت می‌شوند نیز گران خواهد بود. سه عامل مهم محدودیت در استفاده از این منبع انرژی عبارت‌اند از :

۱ــ بالا بردن هزینه‌ی برق،

۲ــ عمر کوتاه المان‌های حرارتی،

۳ــ گران قیمت بودن المان‌های حرارتی.

این سه عامل سبب شده‌اند کوره‌های الکتریکی در کارخانجات بزرگ کم‌تر به کار گرفته شود ؛ با این همه،تمیزی سوخت وکنترل اتمسفر کوره، ساده و سهل‌الوصول بودن سوخت، نیز بازده و راندمان حرارتی بسیار بالا، سبب به‌کارگیری الکتریسیته به مثابه‌ی منبع تولید انرژی در وضعیت‌های خاص است.

حتی در کارگاه‌های کوچک استفاده از کوره‌های الکتریکی نیز مرسوم است.

کنترل برنامه‌ی پخت، اتمسفر کوره و بررسی تغییرات قطعه در حین فرآیند پخت، از عوامل بسیار مهمی است که کاربرد کوره‌های الکتریکی را در آزمایشگاه‌ها و آزمایشگاه کارخانجات امری ضروری ساخته است.

پیشرفت‌های دهه‌ی اخیر در کلیه‌ی صنایع، به‌خصوص در صنعت سرامیک امکان استفاده از کوره‌های مایکروویو را فراهم کرده است. در این کوره‌ها تولیدکننده امواج مایکروویو انرژی خود را به صورت تابش امواج به قطعه منتقل می‌کنند. انرژی جذب‌شده در قطعه به افزایش دما منجر می‌شود و نهایتاً پخت محصول به زمان کوتاهی کاهش می‌یابد. به‌طورکلی انتخاب نوع و اندازه‌ی کوره در پخت سرامیک‌های مختلف براساس فاکتورهایی نظیر سوخت قابل دسترس، دمای مورد نیاز پخت، جنس محصول و فاکتورهای اقتصادی تعیین می‌شود. در حقیقت کلیه‌ی ملاحظات فنی و اقتصادی در انتخاب کوره‌ی مناسب دخالت دارند. به‌عنوان مثال در یک کشور مثل ایران با ذخایر گاز فراوان کوره‌های گازسوز ارجحیت بیش‌تری دارند. از سوی دیگر در محصولاتی که به اتمسفر کوره بسیار حساس‌اند، لازم است از کوره‌های الکتریکی یا مایکروویو استفاده کنند.

طراحی، ساخت و بهره‌برداری مناسب از کوره‌های صنعتی در صنعت سرامیک از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به گونه‌ای که یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای ارزیابی محصولات سرامیکی به مرحله‌ی پخت آن بستگی دارد.

شکل ۶ــ۶ــ کوره‌های آزمایشگاهی مافل «تابش غیرمستقیم حرارت به قطعه»

شکل ۷ــ۶ــ کوره‌های آزمایشگاهی غیر مافل «تابش مستقیم حرارت به قطعه»

پرسش‌های فصل ششم

۱ــ مراحل پخت قطعات در کوره را نام ببرید و هر یک را به اختصار شرح دهید.
۲ــ هم‌جوشی یا زینترینگ را تعریف کنید.
۳ــ دلیل انقباض پخت قطعات را شرح دهید.
۴ــ علت انبساط حرارتی قطعه در حین پخت را توضیح دهید.
۵ــ علت انبساط حجمی قطعه در حین پخت را شرح دهید.
۶ــ مهم‌ترین عوامل پیچیدگی و دفرمگی در قطعات، هنگام پخت، چیست؟
۷ــ چگونه عدم یک‌نواختی انتقال حرارت، قطعه را دفرمه می‌سازد؟
۸ــ برای جلوگیری از بروز دفرمگی، قطعات را چگونه درکوره می‌چینند و می‌پزند؟
۹ــ برنامه‌ی پخت کوره‌های سرامیکی را تعریف کنید.
۱۰ــ انواع کوره‌ها براساس نوع و زمان کار کدام‌اند؟
۱۱ــ مراحل پخت در کوره‌ی متناوب را نام ببرید.
۱۲ــ چگونه کوره‌های هوفمن از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کند؟
۱۳ــ نحوه‌ی پخت در کوره‌های تونلی را نام ببرید.
۱۴ــ مناطق مختلف کوره‌های تونلی را نام ببرید.

واژه نامه

accelerater	شتاب‌دهنده، تسریع کننده
amorphous	آمورف
annealing	تنش‌زدایی (آنیل کردن)
anthracite	آنتراسیت
batch extruder	اکسترودر مرحله‌ای
biscuite	بیسکویت
black core	عیب مغز سیاه
blow - blow	روش دمش ــ دمش
body	بدنه
bone china	چینی استخوانی
bounded water	آب جذب‌شده
burner block	بلوک مشعل
casting	ریخته‌گری
chemical water	آب شیمیایی
clay broadener	گل‌پهن‌کن
colburn	روش کُلبرن
cold isostatic press (CIP)	روش پرس ایزواستاتیک سرد
conduction	هدایت
continuous dryer	خشک‌کن پیوسته
convection	کنوکسیون (همرفت)
crack	ترک
De - airing pugmill	پاگمیل هوازدا
decomposition	تجزیه
decoration firing	پخت دکور
defects	عیوب
deflocculated slip	دوغاب روان‌سازی‌شده
deflocculation	روانسازی
deformation	دفرمگی (بی‌شکلی)
densification	افزایش دانسیته قطعه
die	سمبه
drian casting	ریخته‌گری تخلیه‌ای

drying	خشک‌کردن
dry pressing	پرس خشک
electric insulator	مقرّه
element	المنت
evaporation	تبخیر
fast firing	پخت سریع
filter press	فیلتر پرس
firing	پخت
firing atmosphere	اتمسفر پخت
firing defects	عیوب پخت
firing fuel	سوخت کوره
firing schedule (program)	برنامه پخت
firing stages (steps)	مراحل پخت
firing strength	استحکام پخت
firing zones	مناطق کوره پخت
float	شناور (فلوت)
flux	کمک‌ذوب (فلاکس)
fused cast	ذوب و ریخته‌گری‌شده
fusion casting	روش ذوب و ریخته‌گری
glazed	لعابدار
glaze firing (glost firing)	پخت لعاب
granole	گرانول
hand made - manual	روش دستی
heat transfer	انتقال حرارت
heat treatment	عملیات حرارتی
hoffman kiln	کوره هوفمن
hollow	توخالی
hollow casting	ریخته‌گری توخالی
hollow cylinder	استوانه توخالی
homogeneous	همگن‌سازی
hot isostatic press (HIP)	پرس ایزواستاتیک گرم
interparticle water	آب بین‌ذره‌ای
isostatic press	پرس ایزو استاتیک
jigger	جیگر
jiggering	شکل‌دادن به‌وسیله جیگر
jolly	جولی

jollying	شکل‌دادن به‌وسیله جولی
kiln (furnace) arrangement	چیدمان
lamination	لایه‌لایه‌شدن
lattice water	آب شیمیایی (آب هیدراته)
leather hard	لدرهارد (چرمینگی)
lignite	زغال‌سنگ قهوه‌ای (لیگنیت)
Liquid phase	فاز مایع
manual shaping	شکل‌دادن دستی
mixer	مخلوط‌کن
mold / mould	قالب
molten glass	شیشه یا مذاب شیشه
molten metal	مذاب فلز
multi - pieces mould	قالب چند تکه
Peat	تورب
permeable (porous) mould	قالب متخلخل
phase transformation	استحاله‌های فازی
plasticity factor	عدد پلاستیسیته
plastic shaping	شکل‌دهی پلاستیک
plate	بشقاب
porosity water	آب تخلخل
pottery wheel	چرخ کوزه‌گری
pre shaping	پیش‌شکل‌دادن
press	پرس‌کردن
press - blow	روش پرس ــ دمش
pugmill	پاگمیل
radiation	تشعشع (تابش)
ramming	کوبیدن
refractory	دیرگداز
retarder	کند کننده
roller	غلتک (رولر)
roller machine	ماشین رولر
rotating	گردان
saggar	ساگار
screw extruder	اکسترودر حلزونی
semidry pressing	پرس نیمه‌خشک
shales	کُک

shaping	شکل‌دادن
shrinkage	در هم فرورفتن
sinter	زنیتر
slag	سرباره
slip	دوغاب
slip casting	ریخته‌گری دوغابی
sodium carbonate	کربنات سدیم
sodium salts	نمک‌های سدیم
sodium silicate	سیلیکات سدیم
sodium sulfate	سولفات سدیم
solid casting	ریخته‌گری دوغابی توپر
solid cylinder	استوانه توپر
spindle	اسپیندل
spray dryer	اسپری درایر (خشک‌کن پاشیدنی)
star type crack	ترک شمعدانی (ستاره‌ای)
stencil	شابلون
store	ذخیره‌سازی، انبارکردن
s - type crack	ترک S شکل
suspension water	آب سوسپانسیون
symmetrical bodies	ظروف متقارن
thermal conductivity	هدایت حرارت
thermal expansion	انبساط حرارتی
thermo couple	ترموکوپل
tile	کاشی
trimming / polishing	پرداخت‌کردن
tungsten carbide	کاربید تنگستن
tunnle kiln	کوره تونلی
turning	تراش (خراطی)
vaccuming	هواگیری
viscosity	ویسکوزیته
void	حفره (مُک)
wood	چوب (و زغال)

منابع و مآخذ

منابع فارسی

۱ــ مارقوسیان، واهاک کاسپاری. «دیرگدازها»/ جهاد دانشگاهی صنعتی شریف/ نوبت چاپ چهارم / ۱۳۶۹.

۲ــ رحیمی، افسون ؛ متین، مهران. «تکنولوژی سرامیک‌های ظریف»/ شرکت خاک چینی ایران، نوبت چاپ دوم / ۱۳۸۳.

۳ــ سرپولکی، حسین. «شکل دادن پلاستیک سرامیک‌ها».

۴ــ تشکری، شعبانعلی. «سرامیک برای اهل فن»/ انتشارات گویا/ نوبت اول/ ۱۳۷۰.

منابع خارجی Refrences

۱ ــ Singer,Felix; Singer,Sonya. "Industrial Ceramics" / Chapman & Hall LTD/1960.

۲ ــ F. H. Norton "Introducton To elements of Ceramics".

۳ ــ S.Reed, James, Wileg,Jon "Principles of Ceramic Processing".

۴ ــ F. H. Norton "Fine Ceramic".

۵ ــ Ryan, W.; Read ford,C. "Whitewares: Production, Testing And Quality Contral" / Pergamon Press/1989.

۶ ــ Dinsdale, Allen. "Pottery Scierice, Materials, Processes & Products"/ 1986.

۷ ــ F. H. Norton "Refractories".