فصل پنجم

خشک کردن سرامیک‌ها

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

۱ــ خشک‌کردن را تعریف کند.

۲ــ عوامل مؤثر برخشک شدن را بیان کند.

۳ــ انواع آب‌های موجود در قطعات سرامیکی را نام ببرد.

۴ــ مکانیسم انتقال آب از قطعه حین خشک شدن را شرح دهد.

۵ــ حالت چرمینگی قطعه را شرح دهد.

۶ــ دلیل انقباض خشک قطعه را توضیح دهد.

۷ــ مکانیزم‌های انتقال حرارت را نام ببرد.

۸ــ خشک‌کن‌ها را براساس عملیات کاری تقسیم‌بندی کند.

۹ــ خشک‌کن‌ها را براساس مکانیزم انتقال حرارت تقسیم‌بندی کرده نام ببرد.

۱۰ــ نحوه‌ی خروج آب از قطعه‌ی سرامیکی را بازگو کند.

۱۱ــ تأثیر ابعاد قطعه بر روی سرعت خشک شدن را توضیح دهد.

۱۲ــ دلایل بروز عیب در حین فرآیند خشک شدن را نام ببرد و هر یک را شرح دهد.

مقدمه

در فصل‌های پیشین روش‌های مختلف شکل‌دادن سرامیک‌ها را آموخته‌ایم. با دقت در فرآیند شکل دادن و هم‌چنین در مرحله‌ی آماده‌سازی در می‌یابیم که در بیش‌تر موارد از آب استفاده می‌شود. گاه برای آماده‌سازی مواد اولیه و گاه به عنوان محمل برای سیلان و حرکت ذرات جامد در یک دوغاب، زمانی به بروز پلاستیسیته‌ی مواد رسی کمک می‌کند و گاه نیز با مقادیر بسیار کم، رطوبت مورد نیاز فرآیند شکل دادن را توسط پرس تأمین می‌کند.

آب در مراحل مختلف فرآیند ساخت سرامیک‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. اما در پایان مراحل تقریباً در تمامی این کاربردها لازم است تا آب مصرفی از قطعه خارج شود و این عمل عمدتاً در خشک‌کن‌ها صورت می‌گیرد.

خروج آب از قطعه باعث نزدیک‌تر شدن ذرات جامد سرامیکی به یکدیگر و کاهش ابعاد محصول می‌گردد. میزان این انقباض وابستگی مستقیمی به میزان آب مصرفی در مراحل قبلی دارد. ولی سؤالی دراین مورد مطرح است :

آیا خروج آب به هر روشی خشک‌کردن نام دارد؟

آیا کاهش آب دوغاب توسط فیلتر پرس نیز خشک‌کردن نام دارد؟

به طور کلی خشک کردن خروج آب از نمونه‌ی شکل داده شده به طریق تبخیر است. به عبارت دیگر، انتقال حرارت از محیط بر قطعه و انتقال هم‌زمان آب در جهت مخالف فرآیند خشک‌کردن نامیده می‌شود.

بر مبنای همین تعریف خشک‌کردن محصولات سرامیکی می‌تواند به صورت طبیعی در هوای آزاد مانند خشک‌کردن آجرهای ساختمانی، انجام پذیرد. از طرف دیگر خشک‌کردن یک محصول سرامیکی می‌تواند درخشک‌کن‌های تنها پیوسته تونلی یا خشک‌کن‌های غیر پیوسته انجام پذیرد. گاه زمان خشک‌کردن بر چند ده ساعت به طول می‌انجامد و گاه با استفاده از ماکروویو می‌توان زمان خشک‌شدن را به چند دقیقه کاهش داد.

همان‌طورکه گفته شد هم‌زمان با خروج آب، محصول کوچک و کوچک‌تر می‌شود. اما انقباض تا پایان مرحله‌ی خشک‌کردن ادامه نمی‌یابد. در حقیقت خروج بخشی از آب باعث انقباض قطعه می‌شود ولی در مراحل پایانی خشک‌شدن انقباض پایان پذیرفته است. اما نکته‌ی قابل توجه این است که مرحله‌ی خشک‌شدن قطعه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است زیرا تغییرات ابعادی قطعات سرامیکی ممکن است عیوبی مانند تاب، تَرَک و یا دفرمگی ایجاد کند. در حقیقت کنترل دقیق مرحله‌ی خشک‌کردن ضامن تولید محصولاتی بدون عیب یا با ضایعات کم‌تر است.

در تمامی تکنیک‌های خشک‌کردنِ سرامیک‌ها تلاش شده است تا زمان خشک‌کردن کوتاه‌تر و دمای مصرفی کم‌تر شود. کارشناسان و محققان سرامیک می‌کوشند تا به منظور بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن، سریع‌ترین تکنیکی را معرفی نمایند که ضایعات و عیوب را به حداقل برساند.

اغلب در فرآیند آماده‌سازی مواد اولیه، شاهد افزودن آب به آن‌ها هستیم، با این عمل، آماده‌سازی آسان‌تر و بهتر انجام می‌شود ؛ هم‌چنین درصنایع سرامیک‌های سنتی، شکل‌دهی پودر پلاستیک همراه

با عامل کمکی آب صورت می‌گیرد، زیرا این عامل کمکی زمینه‌ی لازم را برای حرکت و لغزش ذرات بر روی یکدیگر فراهم می‌سازد و شکل‌دهی آن‌ها را آسان می‌گرداند. در صورتی که ذرات خشک قابلیت جابه‌جایی بر یکدیگر ندارند و عملاً شکل‌دهی قطعات سرامیکی پیچیده، غیرممکن می‌گردد.

این عامل کمکی پس از آماده‌سازی مواد اولیه و یا شکل‌دهی بدنه‌ی سرامیکی از فرآیند تولید خارج می‌گردد. خروج آب به روش‌های گوناگون و با توجه به نوع آب درون قطعه صورت می‌گیرد. این عمل اگر به‌وسیله‌ی انتقال حرارت صورت پذیرد «فرآیند خشک شدن» نامیده می‌شود.

هم‌چنین خروج آب از نمونه‌ی شکل یافته ــ از طریق تبخیر ــ «خشک کردن» نام دارد.[1]

به عبارت دیگر : **انتقال حرارت از محیط به قطعه و انتقالِ هم‌زمان آب در جهت مخالف را «فرآیند خشک کردن» نامند.**

آب به دلایل مختلف به قطعه وارد می‌گردد و در مراحل مختلف و با روش‌های متفاوت از قطعه خارج می‌شود. شکل و حالت آب در قطعه، روش خروج آب و دمای آن را تعیین می‌کند.

عوامل مؤثر بر خشک شدن سرامیک‌ها

به‌طورکلی عوامل مؤثر بر خشک‌شدن سرامیک‌ها را می‌توان به عوامل بیرونی و درونی، به شرح زیر، طبقه‌بندی نمود :

الف) عوامل بیرونی مؤثر بر فرآیند خشک‌کردن

روش‌های انتقال حرارت و میزان رطوبت و شدت جریان هوا در خشک‌کردن، از جمله عوامل بیرونی به شمار می‌روند.

بدیهی است هرچه از میزان رطوبت موجود در هوا کاسته شود ؛ به عبارت دیگر هرچه هوای خشک کن خشک‌تر باشد، سرعت خشک شدن محصولات بیش‌تر می‌شود. این موضوع را می‌توان در مقایسه‌ی خشک شدن لباس‌های شسته شده در تابستان و زمستان یا در شهرهای مرکزی با هوای خشک و شهرهای کنار دریا با رطوبت زیاد، بهتر درک نمود.

از سوی دیگر افزایش سرعت جریان هوا نقش مؤثری در افزایش سرعت خشک‌کردن دارد. با افزایش سرعت جریان هوا رطوبت تبخیر شده از قطعه دور می‌شود و امکان خروج مجدد بخارات آب فراهم می‌گردد.

در ادامه، روش‌های مختلف انتقال حرارت خواهد آمد.

۱ــ خشک کردن سرامیک‌ها به‌وسیله‌ی امواج مایکروویو نیز صورت می‌گیرد.

ب) عوامل درونی مؤثر بر فرآیند خشک کردن

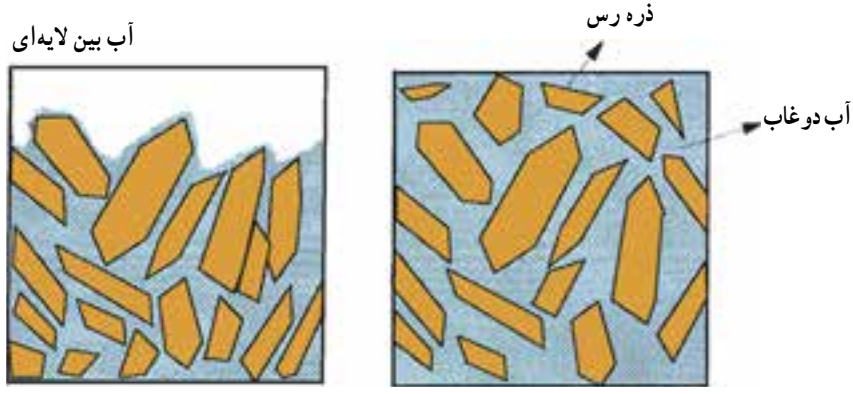
تمامی عواملی که درون قطعه رخ می‌دهد تا آب از لایه‌ی داخلی قطعه به سطوح خارجی منتقل شود عوامل درونی نام گرفته‌اند ؛ از آن جمله می‌توان به چگونگی حرکت آب در داخل قطعه چه به‌صورت مایع و چه به صورت بخار اشاره نمود. اما لازم است انواع آب‌ها و نقش آن‌ها را در خشک‌کردن سرامیک‌ها معرفی نمود.

انواع آب در ساخت سرامیک

ممکن است این برداشت نادرست، که در ساخت یک قطعه، از انواع مختلف آب بهره گرفته می‌شود، به ذهن خطور کند. حال آن که منظور از معرفی انواع آب، اشاره به نقش و وظیفه‌ی قسمتی از آب مصرفی در ساخت سرامیک‌هاست، که رفتار خشک شدن یا دیگر رفتارهای محصول را تبیین می‌نماید. مقادیر زیاد آب ؛ مثلاً در فرآیند ساخت دوغاب، در شکل دادن با رطوبت کم توسط پرس نیمه‌خشک، نقش متفاوتی دارد. در معرفی انواع آب می‌توان از مقادیر زیاد آب به سمت مقادیر کم‌تر آب حرکت کرد.

آب دوغاب (سوسپانسیون): آماده‌سازی مواد اولیه‌ی سرامیکی و بدنه همواره با افزودن حدود ۵۰٪ آب همراه است. آب، ذرات مواد اولیه‌ی موجود در بدنه را کاملاً از یک‌دیگر باز می‌کند و به‌صورت دوغاب (سوسپانسیون) درمی‌آورد. این آب را آب سوسپانسیون یا آب دوغاب نامند که در حین شکل دادن، یا قبل از آن به‌وسیله‌ی قالب یا فیلتر پرس یا ته‌نشین‌سازی، خارج می‌شود و دوغاب به گل تبدیل می‌گردد و معمولاً به مرحله‌ی خشک شدن نیز نمی‌رسد. (شکل ۱ــ۵ــ الف)

آب بین لایه‌ای یا بین ذره‌ای: بعد از آن که آب سوسپانسیون خارج شد ذرات تقریباً به‌یک‌دیگر نزدیک می‌شوند و آب به صورت فیلمی نازک (از چند نانو تا چند میکرون) پیرامون ذرات باقی می‌ماند. این آب به «آب بین لایه‌ای» معروف است. (شکل ۱ــ۵ــ ب)



شکل ۱ــ۵

قطعه در این حالت به شکل گل پلاستیک است و بسته به میزان آب گل پلاستیک، هرچه میزان آب کاهش یابد نیروی لازم جهت شکل‌دادن پلاستیک بیش‌تر می‌شود. خروج آب بین لایه‌ای معمولاً منجر به انقباض محصول می‌شود. به‌همین دلیل گاهی به آن «آب انقباضی» نیز گفته می‌شود.

آب تخلخل

با خروج «آب بین لایه‌ای» ذرات به یک‌دیگر می‌پیوندند و انقباض پایان می‌پذیرد و حال آن که قطعه هنوز خشک نشده است. در این حالت قطعه را می‌توان مانند اسفنج فرض کرد، زیرا قطعه دارای حفره‌ها و تخلخل‌های مملو از آب بسیاری است. آب درون حفره‌ها و تخلخل‌ها را «آب تخلخل» نامند. بدیهی است در صورت ادامه‌ی خشک‌کردن با خروج «آب تخلخل» حین خشک‌شدن، انقباض مشاهده نمی‌شود.

آب جذب شده

مولکول آب به دلیل پیوند میان اکسیژن و هیدروژن جهت دار و قطبی است. از سوی دیگر، می‌دانیم ذرات رس دارای بار الکتریکی هستند زیرا در سطح ذرات، پیوندهای اشباع نشده وجود دارد. شکست ذره‌ی رس عامل بار است. بنابراین، اگر مولکول قطبی آب در مجاورت این ذره‌ی رس قرار گیرد پیوند نسبتاً ضعیفی با ذره ایجاد می‌کند. این آب دارای ابعاد مولکولی است و از طریق نیروی فیزیکی «واندروالس» جذب ذره می‌شود. این آب را «آب جذب شده» گویند. حالت جذبی آب باعث می‌شود در دمای بالاتر از ۱۰۰°C از قطعه خارج گردد، زیرا دلیل این امر، همان طورکه گفته شد پیوند نسبتاً ضعیف است.

آب شیمیایی (آب هیدراته): آب یکی از اجزای سازنده‌ی شبکه‌ی مینرال به‌شمار می‌آید و هرچند به‌صورت فیزیکی در این شبکه (مینرال) موجود نیست، اما به صورت OH در آن وجود دارد. اگر به ساختمان کائولینیت نگاه کنیم دو مولکول(H_2O) خواهیم یافت که جزء ساختار شبکه کائولینیت ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$) است.این آب عملاً وجود ندارد و نمی‌تواند در دمای پایین از شبکه خارج گردد، زیرا خروج آن مستلزم شکست پیوند (OH) در ساختمان است ؛از این‌رو برای شکست پیوند و تأمین انرژی به دمای بالا نیاز دارد ؛برای مثال، آب شیمیایی کائولینیت در دمای بالاتر از ۴۰۰°C آزاد می‌شود و از آن خارج می‌گردد. در دمای بالاتر از ۴۰۰°C پیوندهای هیدروکسیلی (OH) شکسته می‌شود، و آب تشکیل می‌گردد و در حقیقت در این دما به صورت بخار از مینرال خارج می‌شود.

مکانیسم انتقال و خروج آب از قطعه حین خشک‌شدن

همان‌طورکه قبلاً گفته شد، خروج آب دوغاب (سوسپانسیون) به کمک فیلتر پرس یا قالب گچی انجام می‌شود و عموماً در خشک کن انجام نمی‌شود. تنها در برخی موارد مثل صنعت کاشی دوغاب وارد خشک‌کن پاشیدنی (اسپری درایر) می‌شود تا پودر گرانول مرطوب تهیه شود.

در این حالت حجم زیاد آب دوغاب به طور سریع خشک می‌شود. از آن‌جایی که محصول به‌دست‌آمده به‌صورت پودر است و نه یک محصول ساخته شده، انقباض، تَرَک و دیگر عیوب در آن مشاهده نمی‌شود و یا چندان اهمیتی ندارد ؛ زیرا چنین پودری در فرآیند شکل‌دادن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در حقیقت مراحل ابتدایی خشک‌کردن سرامیک‌ها با خروج آب بین لایه‌ای یا آب انقباض آغاز می‌گردد. هنگامی که یک قطعه‌ی خیس مانند قوری و قندان که به روش ریخته‌گری دوغابی شکل داده شده یا بشقاب و کاسه که به صورت پلاستیک ساخته شده‌اند در خشک‌کن قرار می‌گیرند، ابتدا سطح قطعه شروع به خشک‌شدن می‌کند. در همین حال به‌دلیل به‌وجودآمدن اختلاف درصد آب بین لایه‌ی سطحی و لایه‌ی درونی که معروف به شیب رطوبتی است، آب از درون به سمت بیرون قطعه حرکت می‌کند تا یک‌نواختی رطوبت دوباره برقرار گردد. در این مرحله آب به‌صورت مایع حرکت می‌کند. همزمان با خروج آب از قطعه، درصد رطوبت کلی محصول کاهش می‌یابد و انقباض یا نزدیک شدن ذرات به‌دلیل خروج آب رخ می‌دهد. در تمامی این مرحله از خشک شدن، آب به صورت مایع از درون به سطح می‌آید و با تبخیر از سطح خارج می‌گردد.

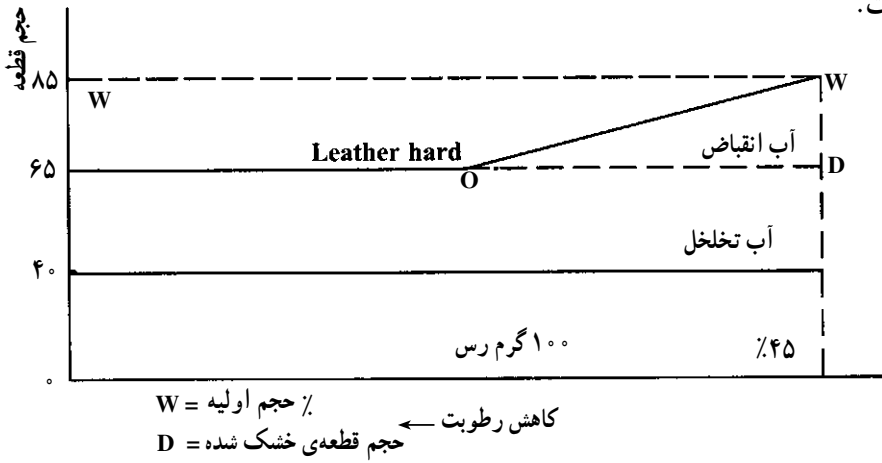
در پایان این مرحله که انقباض هم پایان می‌پذیرد، قطعه‌ی مرطوب تخلخل‌های زیادی دارد و مملو از آب است و قطعه از حالت گل پلاستیک به‌صورت دونم چرمینه درآمده است.

به همین دلیل پایان مرحله‌ی اول خشک شدن در سرامیک، به نقطه‌ی چرمینگی یا نقطه‌ی لدرهارد معروف است. در این مرحله رنگ قطعه روشن‌تر می‌شود و به رنگ خاک خشک یعنی رنگ تقریباً سفید شیری درمی‌آید. تغییر رنگ قطعه حین خشک‌شدن، نشان‌عبور از نقطه‌ی لدرهارد دارد.

در مرحله‌ی چرمینگی قطعه از استحکام نسبی برخوردار است. بنابراین، عملیات پرداخت را می‌توان در این مرحله با رطوبت کم‌تر از حالت چرمینگی آغاز کرد. این نقطه‌ای است که سفالگران سنتی به آن «دونم» می‌گویند.

با ادامه‌ی فرآیند خشک‌کردن، رطوبت موجود در قطعه، ابتدا در لایه‌ی درونی تبخیر می‌شود، سپس به‌صورت بخار خارج می‌گردد. در حقیقت آب درونِ خُلَل و فُرَج تخلیه می‌شود و این کار تا خشک‌شدن کامل قطعه ادامه می‌یابد.

در نمودار زیر تغییرات حجم قطعه، حین خشک‌شدن و نقطه‌ی چرمینگی، نشان داده شده است.



فرض کنید از ۱۰۰ گرم رس خشک و ۴۵٪ رطوبت، یک قطعه سرامیکی مرطوب ساخته شده است و حجم قطعه‌ی ساخته شده، پس از دانسیته مواد اولیه از خشک شدن کامل، ۴۰ سانتی‌مترمکعب باشد. در این صورت حجم قطعه‌ی مرطوب در آغاز مرحله‌ی خشک‌شدن ۸۵ سانتی‌متر مکعب است. با آغاز مرحله‌ی خشک‌کردن، رطوبت کاهش می‌یابد و معادل حجم آب خارج شده حجم قطعه نیز کاسته می‌شود (از W تا O) تا نقطه‌ی مرز لدرهارد برسد که انقباض پایان یافته است که حجم قطعه به ۶۵ سانتی‌مترمکعب می‌رسد درصد رطوبت O با ادامه فرآیند خشک‌کردن (از O تا D)، باقی مانده آب از قطعه مرطوب خارج می‌شود اما حجم قطعه تغییر نمی‌کند ؛ چون از مرز لدرهارد گذشته است. یعنی حجم ثابت می‌شود. در این حالت با خروج رطوبت از تخلخل‌ها، هوا جای آن‌را می‌گیرد. در پایان خشک‌کردن، حجم نهایی قطعه ۶۵ سانتی‌متر مکعب است که ۴۰ سانتی‌مترمکعب آن حجم رس و ۲۵ سانتی‌مترمکعب آن حجم خُلَل و فُرَجِ موجود در قطعه است.

شایان ذکر است که چون در «نقطه‌ی چرمینگی» انقباض پایان می‌پذیرد، احتمال ترک‌خوردن و معیوب شدن نیز کم‌تر می‌شود. از این رو در مرحله‌ی اولیه‌ی خشک‌کردن سرامیک‌ها لازم است تا سرعت خشک‌کردن آهسته باشد و پس از عبور از «نقطه‌ی لدرهارد» می‌توان سرعت خشک کردن را با افزایش دما یا سرعت جریان هوا افزایش داد.

مکانیسم انتقال حرارت

گرما چیست؟ انسان از گذشته‌های بسیار دور در برابر این پرسش قرار داشته است و متناسب

با دانش زمان خود، جوابی به این پرسش داده است.

یونانیان قدیم گرما (آتش) را یکی از عناصر چهارگانه‌ی اولیه‌ی هستی می‌دانستند که جهان از آن ساخته شده است. پس از آن در علم کیمیا از عناصر گرمازا یاد کرد. یعنی برخی از عناصر قابلیت تولید گرما را دارند. سرانجام، با بیان تئوری مولکولی، ماهیت گرما را کاملاً تعریف کردند :

گرما نوعی از انرژی است که به سبب اختلاف دمای دو سیستم، از یک سیستم به سیستم دیگر انتقال می‌یابد.

به‌طور کلی قطعات سرامیکی با انتقال حرارت از بیرون به بدنه‌ی آن‌ها خشک می‌شوند.

گرما به‌روش‌های مختلفی مانند استفاده از مشعل، که با سوخت‌های فسیلی یا گاز کار می‌کنند، الکتریسیته و امواج مایکروویو تولید می‌شود. حتی از گرمای خروجی کوره و اگزوز برای گرم‌کردن خشک‌کن‌ها استفاده می‌شود. اما چگونگی انتقال حرارت از منبع تولید گرما به محصول در حال خشک‌شدن بسیار اهمیت دارد.

نحوه‌ی انتقال حرارت از خارج به قطعه با سه روش میسر و ممکن خواهد بود :

ـ هدایت،

ـ همرفت (کنوکسیون)،

ـ تشعشع(تابش).

هدایت

اگر ابتدای میله‌ای فلزی را بر روی شعله قرار دهیم پس از مدتی انتهای میله گرم خواهد شد. چگونه این عمل را توجیه می‌کنید؟

هرگاه قسمتی از ماده را گرم کنیم به آن انرژی حرارتی داده‌ایم ؛ به عبارت دیگر، با حرارت دادن، انرژی منتقل شده به‌صورت جنبش مولکولی در ماده ظاهر می‌گردد.

به علت تماس مولکول‌ها با یکدیگر جنبش مولکولی با سهولت به دیگر نقاط منتقل می‌شود و با این عمل، انرژی یا گرما از یک جهت به نقاط دیگر منتقل می‌گردد.

جابه‌جایی انرژی حرارتی که به وسیله‌ی مولکول‌های ماده (جسم جامد) صورت می‌گیرد، «هدایت حرارتی» نام دارد. در این مکانیزمِ انتقال، وجود مولکول‌ها ضروری است، زیرا عامل هدایت‌اند.

هرگاه یک قطعه‌ی سرامیکی را روی سطح گرم قرار دهیم، حرارت از سطح گرم به قطعه و

سپس به داخل قطعه هدایت خواهد شد، زیرا هرگاه میان دو نقطه اختلاف دما وجود داشته باشد انتقال حرارت انجام می‌گیرد و همواره انتقال از نقطه‌ی گرم به نقطه‌ی سرد خواهد بود.

در خشک‌کن‌های کف گرم محصولات شکل‌داده شده را بر روی یک سطح گرم، جهت خشک‌شدن قرار می‌دهند.

همرفت (کنوکسیون)

آیا به نحوه‌ی گرمادهی رادیاتورهای شوفاژ فکر کرده‌اید؟ چگونه هوای اتاق گرم می‌گردد؟ در مکانیزم هدایت وجود جسم جامد و مولکول‌ها ضروری بود، اما در این حالت، مولکول‌ها با یک‌دیگر تماس مستمر ندارند. پس انتقال حرارت چگونه رخ می‌دهد؟

بهترین نمونه‌ی انتقال حرارت با مکانیزم همرفت، نحوه‌ی گرمادهی اتاق از طریق رادیاتورهای گرم است. مولکول‌های هوا از کنار رادیاتورها عبور می‌کنند و گرم می‌شوند. می‌دانیم هوای گرم به دلیل سبک بودن به سمت بالا می‌رود و هوای سرد جانشین آن می‌شود و چرخش مداوم هوای گرم و سرد در اتاق به گرمادهی در کل اتاق منجر می‌گردد.

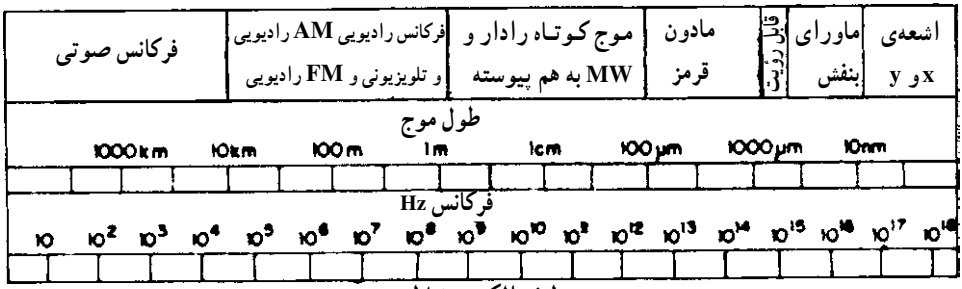
به طور کلی در همرفت (کنوکسیون)، یک سیال (هوا) از روی قطعه عبور می‌نماید. در این حالت، مولکول سیال که گرم است قطعه را گرم می‌کند. لازمه‌ی این مکانیزم وجود سیال و فعال بودن مولکول گاز گرم است. در این انتقال (همرفت)، حرکت و جریان هوا (انتقال جرم) لازم است و هوای گرم در این شیوه، تأمین حرارت لازم را برای خشک شدن قطعه از سطح تأمین می‌کند. خشک‌کن کنوکسیونی در صنایع سرامیک به کار می‌برند و با انتقال هوای داغ به داخل یک محفظه باعث می‌شود هوای گرم به سمت قطعه حرکت کند و موجب گرم‌کردن و نهایتاً خشک‌شدن آن شود.

تشعشع

خورشید مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده‌ی انرژی حرارتی کره‌ی زمین است. حرارت خورشید چگونه انتشار می‌یابد؟

در این مکانیزم، انتقال حرارت از طریق هدایت، مطرح نمی‌گردد. چرا؟ مکانیزم همرفت را نیز نمی‌توان روش مناسب انتقال حرارت دانست، زیرا فاصله‌ی زمین تا ستاره‌ی خورشید را فضای تقریباً خالی از مولکول دربر گرفته است. پس باید مکانیزمی را جست‌وجو کرد که حرارت، بدون نیاز به جسم جامد یا سیال (هوا)، منتقل و منتشر شود و از جسم گرم به جسم سرد، بدون دخالت هوای بین

آن‌ها، انتقال یابد. از سطح خارجی اجسام، انرژی‌ای ساطع می‌شود که می‌تواند از طریق امواج الکترومغناطیس (شکل ۲ــ۵) جابه‌جا گردد.



شکل ۲ــ۵

خروج دایمی انرژی از سطح ماده را «تابش» گویند. انتقال حرارت در مکانیزم تابش یا تشعشع نیاز به مولکول‌های مواد ندارد و همان‌گونه که گفته شد، انتقال انرژی از طریق امواج صورت می‌گیرد. این امواج، مادون قرمز نامیده می‌شوند. همه‌ی اجسام، توانایی تابش (تشعشع) دارند[1]، اما مقدار این توانایی متفاوت است. توانایی انتقال حرارت به‌وسیله‌ی تابش به دلایلی چند مربوط است که خارج از بحث ماست و در مقاطع بالاتر بدان خواهیم پرداخت. خشک‌کن‌های الکتریکی که المنت‌های حرارتی با تشعشع خود قطعه را خشک می‌کند نمونه‌ای از خشک‌کن‌های تشعشعی است.

انتقال حرارت در مکانیزم تشعشع، همانند مکانیزم همرفت، فقط سطح قطعات را گرم می‌کند و انتقال گرما به درون قطعه را از طریق مکانیزم هدایت انجام می‌شود.

گرچه در این قسمت تلاش شده است تا مکانیسم‌های انتقال حرارت به‌طور مجزا معرفی شوند اما در حقیقت هر مکانیسمی به‌تنهایی حرارت را منتقل نمی‌کند. به‌عنوان مثال در خشک‌کن‌های هدایتی، علاوه بر گرم‌شدن قطعات، هوای اطراف هم گرم می‌شود و کنوکسیون رخ می‌دهد. دیگر این‌که هر قطعه، از خود گرمی تشعشع می‌کند و این تابش توسط اجسام سرد جذب می‌شود. در یک رادیاتور شوفاژ، که اتاق را گرم می‌کند، بیش‌تر حرارت انتقالی توسط مکانیسم کنوکسیون صورت می‌گیرد، ضمن این که لوله‌ها و رادیاتور حاوی آب گرم در لوله و کف اتاق را نیز گرم می‌کند. هم‌چنین گرمای رادیاتور با تشعشع خود در گرم کردن اتاق نقش دارد. در حقیقت همه‌ی مکانیسم‌های انتقال حرارت فعال‌اند، اما ممکن است یکی از آن‌ها نقش اصلی را داشته باشد و خشک‌کن ساخته شده به تبعیت از عامل اصلی، خشک‌کن هدایتی، کنوکسیونی و یا تابشی نامگذاری می‌شود.

۱ــ هر جسم به‌طور پیوسته تشعشع می‌نماید ؛ مگر آن که به دمای صفر مطلق برسد.

انواع خشک‌کن‌ها در صنعت سرامیک

از دیرباز سفالگران قطعات ساخته شده را در فضای باز کارگاه‌ها قرار می‌دادند تا خشک و آماده‌ی پخت شوند، اما امروزه استفاده از این شیوه غیراقتصادی است و هم‌چنین زمان بسیاری را صرف می‌کند تا قطعه کاملاً خشک شود. اجرای این شیوه در کارخانجات بزرگ و با تولید بالا ناممکن است زیرا فضای بسیار وسیعی را برای خشک کردن قطعات تولیدی لازم دارد. از سوی دیگر خشک شدن قطعات در آب و هوای مرطوب به راحتی میسر نیست. بنابراین، طراحی و ساخت اتاقک‌هایی با ابعاد مختلف برای خشک کردن قطعات ضروری است. طراحی و تولید خشک‌کن‌ها براساس نوع، حجم و ابعاد قطعاتی که باید خشک شوند انجام گرفته است.

خشک‌کن‌ها به روش‌های متفاوت طبقه‌بندی شده‌اند، اما بهترین دسته‌بندی خشک‌کن‌ها، طبقه‌بندی براساس عملکرد آن‌هاست.

خشک‌کن‌ها از نظر عملکرد دو نوع‌اند : خشک‌کن‌های پیوسته (مداوم) و غیر پیوسته (غیرمداوم).

خشک‌کن‌های غیرپیوسته (متناوب)

خشک‌کن‌های غیرپیوسته ساختمان ساده‌ای دارند. در این خشک‌کن‌ها قطعات خشک‌شدنی در اتاقک خشک‌کن قرار می‌گیرد ؛ سپس خشک‌کن روشن و گرم می‌شود (تغییر مقدار رطوبت قطعه به جریان هوا و زمان قطعه در خشک‌کن بستگی دارد). در این خشک‌کن‌ها، وضعیت خشک‌شدن را می‌توان با تغییردما یا هوای درون خشک‌کن، در هر لحظه تنظیم کرد. گفتنی است قطعات در حین خشک شدن هم‌چنان در خشک‌کن هستند و پس از پایان مرحله‌ی خشک‌شدن از آن خارج می‌شوند. خشک‌کن‌های غیرپیوسته (شکل ۳ــ۵)می‌توانند بزرگ و یا مشابه خشک‌کن‌های آزمایشگاهی کوچک باشند.

شکل ۳ــ۵ــ خشک‌کن غیرپیوسته (مرحله‌ای)

خشک‌کن‌های پیوسته

دما در خشک‌کن‌های پیوسته در تمامی نقاط یکسان است. اما با حرکت محصولات، دما افزایش می‌یابد و در پایان مجدداً کاسته می‌شود و سپس قطعه‌ی خشک را از آن بیرون می‌آورند. خشک‌کن‌های پیوسته اغلب دایره‌ای شکل یا تونلی (شکل ۴ــ۵) هستند. خشک‌کن‌های تونلی معروف‌ترین خشک‌کن‌های پیوسته در صنعت سرامیک هستند. در این خشک‌کن‌ها قطعات تر به‌طور مداوم وارد و از سوی دیگر به صورت خشک‌خارج می‌شوند و برخلاف خشک‌کن‌های متناوب، قطعات در حین خشک‌شدن در حرکت‌اند.

خشک‌کن‌های پیوسته در مقایسه با خشک‌کن‌های غیرپیوسته (متناوب) کاربرد بیش‌تری در صنعت دارند، زیرا در آن‌ها مواد یا قطعات به صورت یک‌نواخت‌تر خشک می‌شوند و فرآیند خشک شدن بهتر کنترل می‌گردد ؛ هم‌چنین آن‌ها را به‌گونه‌ای ساده‌تر می‌توان به صورت اتوماتیک درآورد. نکته‌ی دیگر این که انرژی مصرفی آن‌ها کم‌تر است. بنابراین می‌توان گفت : غالباً خشک‌کن‌های مداوم بازده بیش‌تری نسبت به خشک‌کن‌های متناوب دارند. اما به هر حال هر دو نوع خشک‌کن، بسته به کاربرد آن‌ها، انتخاب و به‌کار گرفته می‌شوند.

شکل ۴ــ۵ــ خشک‌کن تونلی دوقلو برای خشک‌کردن کاشی

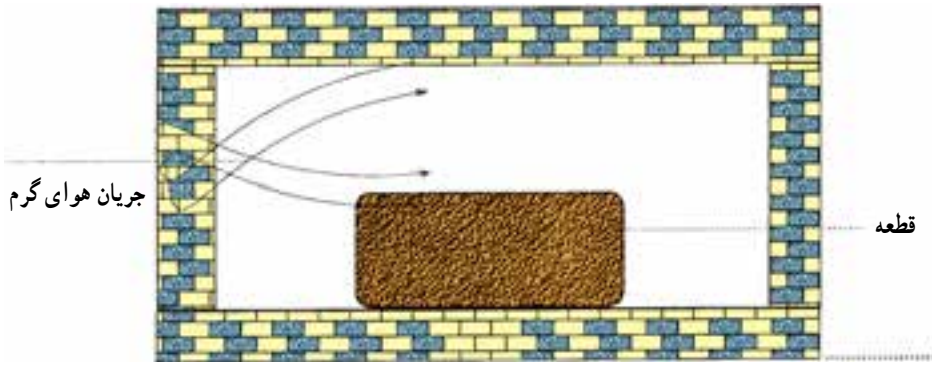
مکانیسم خشک‌کن‌ها

با مکانیسم‌های مختلف انتقال گرما آشنا شدیم. خشک‌کن‌ها نیز بر همان اساس طراحی و ساخته شده‌اند. خشک‌کن‌های صنایع سرامیک، قطعات شکل داده شده یا مواد اولیه‌ی آماده‌سازی

شده را خشک می‌کنند.

خشک‌کن‌های مداوم و متناوب را براساس مکانیسم انتقال حرارت، می‌توان به انواع مختلفی طبقه‌بندی نمود ؛ برخی از این خشک‌کن‌ها عبارت‌اند از :

الف ــ خشک‌کن‌های کنوکسیونی(همرفتی): این خشک‌کن‌ها حرارت را با جابه‌جایی گاز گرم (هوا) به سطح قطعه‌ی سرامیکی یا مواد اولیه‌ی مرطوب انتقال می‌دهند. معمولاً در این خشک‌کن‌ها هوا از روی ماده‌ی تر عبور داده می‌شود تا رطوبت ماده خارج گردد (شکل ۵ــ۵). برای صرفه‌جویی انرژی در این خشک‌کن‌ها مقداری از هوای خروجی مجدداً به خشک‌کن برگشت داده می‌شود.

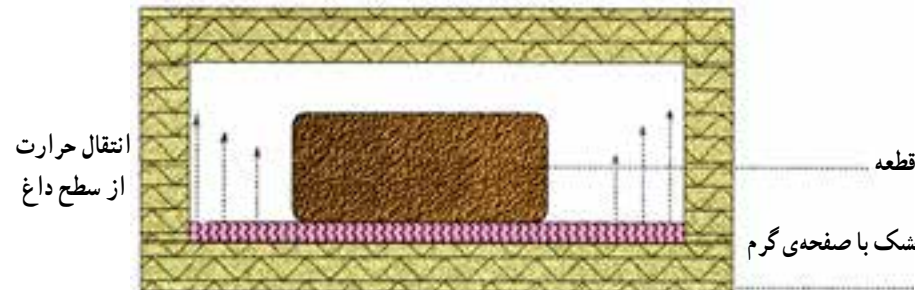


خشک با مکانیسم همرفت

شکل ۵ــ۵

معمولاً در این خشک‌کن‌ها از هوای داغ به‌صورت عامل خشک‌کننده استفاده می‌شود و می‌توان با صرف انرژی هوای داغ تولید کرد و یا می‌توان از حرارت اگزوزها و گازهای خروجی کوره نیز بهره گرفت.

ب ــ خشک‌کن‌های هدایتی (تماسی): این خشک‌کن‌ها براساس «مکانیسم تماسی» طراحی شده‌اند و انتقال حرارت را از یک سطح داغ به کف قطعه‌ی تر منتقل می‌کنند. سطح داغ خشک‌کن که به «خشک‌کن‌های کف گرم» نیز معروف است، به‌صورت سطح نواری، صفحه‌ای استوانه‌ای یا دیواره‌ای، طراحی و ساخته می‌شود. کلیه‌ی خشک‌کن‌هایی که بر این اساس طراحی شده‌اند دارای یک سطح داغ‌اند و معمولاً گرمای مورد نیاز را از طریق بخار داغ، مایعات یا فلزات گداخته (المان‌های حرارتی) تأمین می‌کنند و هنگامی که قطعات، درون این خشک‌کن‌ها و بر روی سطح گرم قرار می‌گیرند حرارت لازم برای تبخیر رطوبت ماده از سطح داغ به قطعه منتقل می‌گردد (شکل ۶ــ۵).



شکل ۶ــ۵

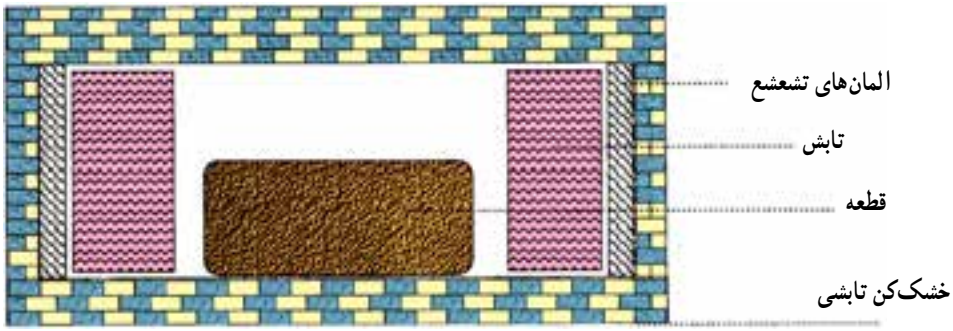
همان‌گونه که اشاره شد در این روش، حرارت منتقل شده به قطعه از سطح قطعه به درون قطعه نفوذ می‌کند ؛ از این‌رو این نوع خشک‌کن‌ها در مقایسه با خشک‌کن‌های انتقالی (همرفت) از بازده بیش‌تری برخوردارند.

چرا بازده خشک‌کن‌های هدایتی بیش‌تر از خشک‌کن‌های همرفتی است؟

ج ــ خشک‌کن‌های تشعشعی (تابشی): پیش از این مکانیسم انتقال تابشی توضیح داده شد. این خشک‌کن‌ها نیز بر آن اساس طراحی شده‌اند و برای تبخیر رطوبت ماده انرژی لازم را از طریق تابش (مانند امواج مادون قرمز) تأمین می‌کند.

لامپ‌های حرارتی، المان‌های حرارتی، سطح گرم و نظایر آن، می‌توانند از عوامل تابش باشند.

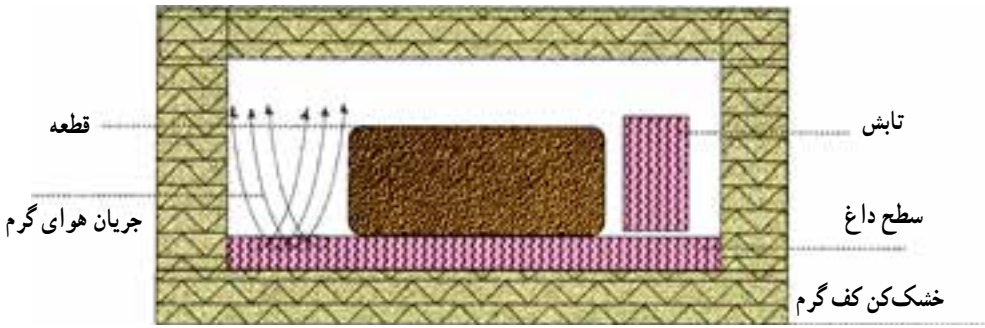
هرگاه قطعه‌ای در درون این خشک‌کن‌ها قرار گیرد در اثر تابش، سطح ماده گرم می‌شود و مولکول‌های ماده تحریک و مرتعش می‌گردند و حرارت به درون ماده نیز نفوذ می‌کند، اما عمق این نفوذ زیاد نیست. به همین دلیل، در این نوع خشک‌کن‌ها سطح ماده گرم می‌شود و بدین وسیله مواد نازک و با ضخامت کم ؛ مانند لعاب (پوشش‌ها و رنگ) خشک می‌شوند (شکل ۷ــ۵).



شکل ۷ــ۵

گفتنی است سرعت انتقال حرارت به کمک تابش بسیار سریع‌تر از روش‌های دیگر است. به‌همین دلیل درخشک کردن قطعات بزرگ وحجیم از خشک‌کن‌های تشعشعی کم‌تر استفاده می‌شود.

باید توجه داشت خشک‌کنی که براساس شیوه‌ای خاص طراحی می‌شود فقط به یک روش حرارت را انتقال نمی‌دهد ؛ برای نمونه، یک خشک‌کن آزمایشگاهی را درنظر بگیرید :



شکل ۸ــ۵

این خشک‌کن (شکل ۸ــ۵) براساس کف گرم و مکانیسم هدایت طراحی گردیده است، اما با اندکی دقت می‌توان دریافت که سطح داغ خشک‌کن مقداری انرژی را به‌صورت تابش نیز تولید می‌کند و این انرژی از طریق امواج الکترومغناطیسی (مادون قرمز) به قطعه‌ی تر می‌رسد.

هم‌چنین هوای داخل محفظه‌ی خشک‌کن درمجاورت سطح داغ گرم شده به سیال فعال (گرم) تبدیل می‌گردد. این سیال انرژی حرارتی را از طریق همرفت (انتقال) به قطعه منتقل می‌نماید. پس خشک‌کنی که براساس مکانیسم هدایت طراحی شده بود به نوعی توسط مکانیسم‌های دیگر نیز حرارت را هدایت می‌کند.

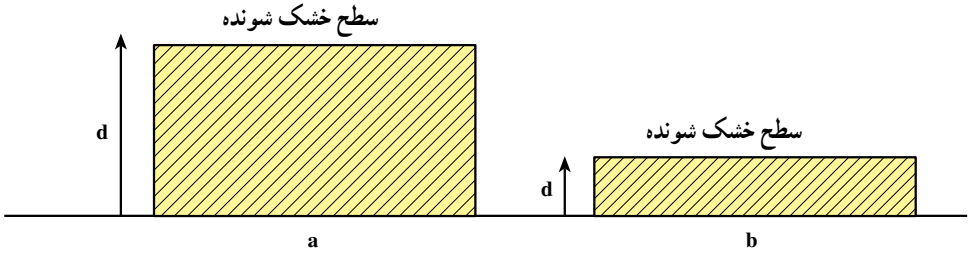
همان گونه که ملاحظه شد خشک‌کن‌ها براساس مکانیسم مشخص طراحی می‌شوند، اما در انتقال حرارت، از روش‌های دیگر انتقال حرارت نیز بهره می‌گیرند.

بررسی قطعات در حین فرآیند خشک‌شدن

هر قطعه‌ی سرامیکی درون خشک‌کن، دارای رطوبت است. این رطوبت باید به کمک حرارت منتشر شود و از (خشک‌کن) تبخیر و از قطعه خارج گردد. اگر به فرآیند خروج آب بیش‌تر دقت کنیم درخواهیم یافت رطوبت در ابتدا از سطح قطعه تبخیر و خارج می‌گردد. از سوی دیگر می‌دانیم، قطعه دارای تخلخل‌های زیادی است. اغلب این تخلخل‌ها همانند مسیرهای باریک به سطح قطعه راه

دارند و همانند لوله‌های بسیار باریک (لوله‌ی مویین) مملو از آب، قطعه را دربر گرفته‌اند. این آب از درون آن‌ها می‌تواند از درون به سطح قطعه حرکت کند. در این حالت تمامی انرژی داده شده به قطعه صرف تبخیر آب می‌شود. به معنای دیگر، در مرحله‌ی اول خشک‌شدن و تا قبل از «نقطه‌ی چرمینگی» دمای قطعه تقریباً ثابت می‌ماند. اما با کاهش رطوبت قطعه و هنگامی که دیگر پیوستگی آب درون قطعه از بین رود، یعنی آب بخار شده از سطح توسط لایه‌های درونی، جبران نمی‌شود. پس لایه‌ی سطحی قطعه خشک‌تر می‌شود، در حالتی که رطوبت درون قطعه بیش‌تر است و با زیادشدن شیب رطوبتی، سطح قطعه گرم می‌شود و حرارت را به داخل هدایت می‌کند. در این حالت آب درون قطعه تبخیر می‌شود و از منافذ آن به‌صورت بخار خارج می‌شود.

تأثیر ابعاد قطعه، حین خشک شدن: با افزایش ضخامت یک قطعه مانند شکل ۹ــ۵ مسیر انتقال رطوبت از درون قطعه به بیرون طولانی‌تر می‌شود. پس انتظار می‌رود قطعه‌ی a که از قطعه‌ی b ضخیم‌تر است، دیرتر خشک شود ؛ یعنی سرعت خشک‌شدن قطعه‌ی a کم‌تر است.



d= فاصله‌ای که آب برای رسیدن به سطح طی می‌کند.

شکل ۹ــ۵

میزان خروج آب از واحد سطح در واحد زمان را «سرعت خشک‌شدن» یا «سرعت خشک‌کردن» می‌گویند.

سرعت خشک شدن یک قطعه سرامیکی همیشه ثابت نیست. در حقیقت در مراحل اولیه‌ی خشک شدن آب سریع‌تر و راحت‌تر از قطعه خارج می‌شود، اما هرچه قطعه خشک‌تر شود سرعت خشک شدن آن نیز کاهش می‌یابد به عبارت دیگر تمایل یک قطعه‌ی مرطوب برای از دست‌دادن آب بیش‌تر از قطعه‌ی نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک است. در قطعات بزرگ و بلوک‌های دیرگداز برای کمک به خروج آب از قطعه، از موادی به نام کمک خشک‌کن استفاده می‌کنند. افزودن نیم درصد کربنات و بیکربنات سدیم کمک زیادی به خشک شدن محصولات حجیم می‌کند. با گرم شدن قطعه، کمک‌خشک‌کن‌ها به‌صورت بخار درمی‌آید و مسیر لوله‌ای موئین را پاک‌سازی و باز می‌کنند. این

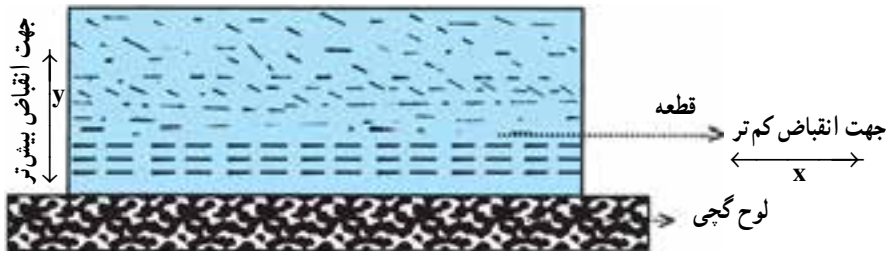
کار کمک شایانی به انتقال آب می‌کند، چه به‌صورت مایع یا بخار از لوله‌ی موئین و خشک شدن محصولات را سریع‌تر و کم‌خطرتر انجام می‌دهد.

عیوب قطعه حین خشک شدن

طی فرآیند خشک شدن، عیوبی مانند پیچش (دفرمه شدن) و تَرَک در قطعات ظاهر می‌شود. برای بروز این عیوب سه دلیل می‌توان ذکر کرد :

۱ــ انقباض غیریکنواخت: به شکل ۱۰ــ۵ نگاه کنید ؛ در یک فرآیند ریخته‌گری دوغابی، ذرات رس به سمت لوح گچی کشیده می‌شوند و تقریباً به‌صورت لایه‌های موازی روی هم قرار می‌گیرند. آب زیادی بین لایه‌های ورقه‌ای‌شکل رس قرار دارد که با خشک شدن خارج می‌گردد. بنابراین انقباض در جهت y و عمود بر ضخامت قطعه بسیار بیش‌تر از انقباض در جهت x است.

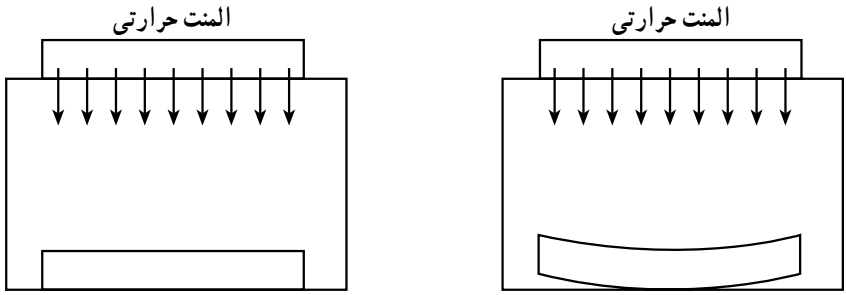
این اختلاف انقباض در جهت‌های مختلف، که به انقباض غیریکنواخت معروف شده ممکن است به بروز تَرَک یا دفرمه شدن قطعه بینجامد.



شکل ۱۰ــ۵

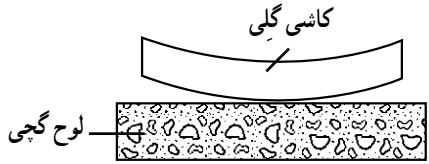
۲ــ خشک کردن غیریکنواخت: اگر یک کاشی در یک خشک کن تابشی، که اشعه‌ی مادون قرمز از بالا بر روی آن می‌تابد، قرار داده شود (شکل ۱۱ــ۵) سطح با لایه‌ی آن ضمن جذب گرما سریعاً خشک می‌شود و موجب انقباض می‌گردد. درحالی‌که سطح پائینی آن به‌کندی خشک می‌شود. در حقیقت شرایط یک‌نواختی برای خشک شدن در قطعه نیست. در این حالت کاشی تاب بر می‌دارد و در ادامه ممکن است به بروز تَرَک نیز منجر گردد.

۳ــ غیریک‌نواختی در خشک شدن: خشک شدن سریع یک کاشی بر روی لوح گچی موجب می‌شود در سطح آن تحدّب به‌وجود آید. این عیب در شکل ۱۲ــ۵ نشان داده شده است.

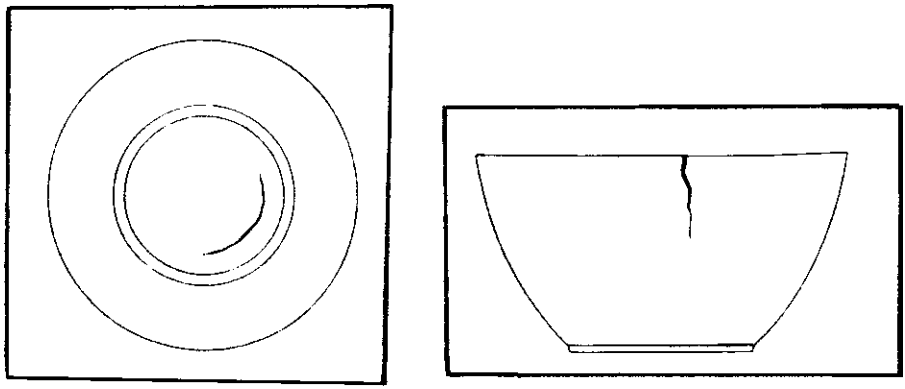


الف ب

شکل۱۱ــ۵



شکل۱۲ــ۵



ترک خشک شدن در لبه‌ی یک قطعه ترک خشک شدن در ته یک قطعه

شکل۱۳ــ۵

پرسش‌های فصل پنجم

۱ــ خشک کردن قطعات سرامیکی را تعریف کنید.
۲ــ انواع آب‌ها در قطعات سرامیکی را نام ببرید.
۳ــ آب سوسپانسیون چیست و در چه مرحله‌ای از قطعه خارج می‌شود؟
۴ــ آیا قطعه با از دست دادن آب بین لایه‌ای قابل شکل‌دهی مجدد است؟ چرا؟
۵ــ چرا آب جذب شده در دماهای بالاتر از $100^{\circ}C$ در قطعه باقی است؟
۶ــ آب شیمیایی چیست و در چه دمایی از قطعه خارج می‌شود؟
۷ــ حالت لدرهارد قطعه را توضیح دهید.
۸ــ مکانیسم‌های انتقال حرارت را نام ببرید و هر یک را شرح دهید.
۹ــ کدام یک از مکانیسم‌های انتقال حرارت بازده بیش‌تری دارد؟
۱۰ــ اساس کار خشک‌کن‌های مداوم و غیرمداوم را شرح دهید.
۱۱ــ انتقال حرارت و خشک شدن قطعه در یک خشک‌کن صفحه‌ی گرم آزمایشگاهی، چگونه صورت می‌گیرد؟
۱۲ــ ابعاد قطعه چه تأثیری بر روی خشک شدن قطعه دارد؟
۱۳ــ دلایل ایجاد عیوب در مرحله‌ی خشک شدن را شرح دهید.
۱۴ــ علت تاب برداشتن قطعه در حین خشک شدن چیست؟