

## فصل نهم

### عملیات پس از شکل دهی و عملیات پرداخت

#### ۹-۱- کلیات فرآیند

عملیات پس از شکل دهی<sup>۱</sup> در فرآیند تولید محصولات شیشه‌ای، شامل عملیات پرداخت، ورز دادن حرارتی<sup>۲</sup> و عملیات حرارتی تنش‌زدایی<sup>۳</sup> می‌باشد. بعد از فرآیند شکل دهی، محصول شیشه‌ای ممکن است تحت شرایط حرارتی خاص یا خشک کردن، عملیات حرارتی سختی دهی<sup>۴</sup>، عملیات حرارتی تنش‌زدایی، لایه گذاری<sup>۵</sup>، پوشش دهی<sup>۶</sup>، پولیش کردن<sup>۷</sup>، تزیین، برش یا سوراخ کاری قرار گیرد.

#### ۹-۱-۱- ورز دادن حرارتی یا خشک کردن

عملیات خشک کردن یا ورز دادن حرارتی در کوره‌ها ممکن است برای تنظیم حرارتی رزین‌ها یا سایر ترکیبات افزوده شده به شیشه ضروری باشند.

- 
- 1- Post-Forming
  - 2- Curing
  - 3- Annealing
  - 4- Tempering
  - 5- Laminating
  - 6- Coating
  - 7- Polishing

### ۲-۱-۹- عملیات حرارتی تنش زدایی

عملیات حرارتی تنش زدایی، فرآیندی است که در آن محصول شیشه‌ای به منظور جلوگیری از اعمال فشارهای زیاد حرارتی به آرامی تا رسیدن به دمای محیط سرد می‌شود. اگر یک محصول شیشه‌ای داغ بطور ناگهانی و به سرعت سرد گردد، ممکن است به راحتی در دمای محیط شکسته شود. اثر این پدیده در مورد محصولات شیشه‌ای با جداره‌های نازک کمتر بوده و اما در محصولات شیشه‌ای با جداره‌های ضخیم تاثیر آن بسیار مهم خواهد بود.

میزان کرنش<sup>۱</sup> یا تغییر شکل نسبی در اثر اعمال تنشهای کششی و فشاری، کاملاً به سرعت عبور شیشه از محدوده دمای بحرانی که اغلب حدود  $۸۴۰^{\circ}\text{F}$  است، بستگی دارد. سرد کردن آرام شیشه در خلال این محدوده دمایی مقادیر کرنش‌های اعمالی را کاهش می‌دهد. عملیات حرارتی تنش زدایی برای کلیه محصولات شیشه‌ای به استثنای الیاف شیشه‌ای و محصولات با جداره‌های خیلی نازک مانند حباب لامپها انجام می‌گیرد.

### ۳-۱-۹- عملیات حرارتی سختی دهی

عملیات حرارتی سختی دهی، برای ایجاد استحکام در شیشه‌های جام و محصولات شیشه‌ای که نیازمند مقاومت حرارتی بالایی هستند (مانند شیشه فر اجاق گاز) استفاده می‌شود. در این عملیات ابتدا شیشه‌ای را که قبلاً مورد تنش زدایی حرارتی قرار گرفته را تا دمایی که کمی پایین تر از دمای مرحله نرم شدن شیشه است، حرارت داده و سپس محصول به سرعت توسط هوای محیط سرد می‌شود<sup>۲</sup>. سرد کردن سریع سبب انقباض شیشه نسبت به نواحی داخلی آن گردیده و در نتیجه تنش‌های داخلی آن آزاد می‌گردد. در این حالت، ادامه سرد کردن سبب ایجاد پروفیل یکنواخت دما در شیشه و توزیع تنش‌ها می‌شود و بنابر این افزایش مقاومت در برابر شکستگی ناشی از خمش حاصل می‌گردد.

### ۴-۱-۹- لایه گذاری

لایه گذاری، فرآیندی است که در طی آن فیلم نازکی از پلاستیک بین دو یا چند لایه شیشه قرار داده می‌شود. بدین ترتیب لایه پلاستیکی از پخش شدن تکه‌های شیشه پس از شکسته شدن آن جلوگیری می‌نماید.

### ۵-۱-۹- پوشش دهی

پوشش دهی، برای ایجاد ویژگی‌های خاص در محصولات شیشه‌ای مانند بازتاب حرارت یا مقاومت در برابر خراش صورت می‌گیرد.

### ۶-۱-۹- تزئین و پلیش دادن

1- Strain  
2- Quenching

سایر فرآیندهای پرداخت، مانند پولیش کردن یا تزیین نیز ممکن است برای ایجاد ظاهری مشخص بر روی محصول شیشه‌ای و یا ایجاد خواص اپتیکی بر روی شیشه انجام گیرند.

### ۷-۱-۹- برش مکانیکی

برش مکانیکی، شامل خط انداختن شیشه با یک ماشین برش شیشه و سپس اعمال فشار جهت شکستن (برش) شیشه می‌باشد.

### ۸-۱-۹- برش حرارتی

در برش حرارتی از یک شعله نیز جهت حرارت دهی مسیر باریکی از محصول شیشه‌ای استفاده می‌شود. سپس جریانی از جت آب باعث می‌گردد تا شیشه در مسیر حرارت داده شده، بشکند. گاهی اوقات نیز حلقه‌ای از شعله جهت حرارت دهی قسمتی از شیشه تا نقطه نرم شدگی آن بکار رفته و سپس قسمت حرارت دیده از شیشه جدا می‌شود.

### ۹-۱-۹- سوراخکاری

بعضی اوقات محصولات شیشه‌ای باید سوراخکاری شوند. سوراخکاری شیشه با استفاده از لوله‌ای از جنس فولاد نرم و کم کربن یا هر فلزات نرم دیگر انجام می‌شود. لوله در حالی که آب صابون در محل سوراخکاری جاری است می‌چرخد. مته‌های تنگستن - کاربرد یا مته الماسه برای سوراخکاری‌های سریعتر و همچنین کنترل ابعادی دقیق‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع مته‌ها گرانیقیمت‌تر و در عین حال دارای طول عمر بالایی می‌باشند.

### ۲-۹- عملیات پس از شکل‌دهی در شیشه جام

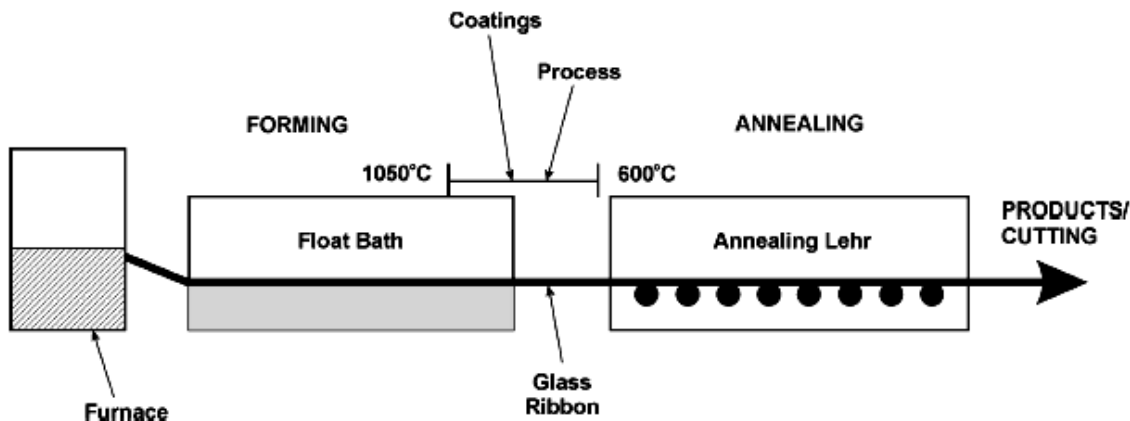
شیشه‌های جام معمولاً تحت عملیات حرارتی تنش‌زدایی، عملیات حرارتی سختی‌دهی، خم کردن، لایه‌گذاری و پوشش دهی قرار می‌گیرند.

### ۱-۲-۹- عملیات حرارتی تنش‌زدایی

پس از شکل‌دهی شیشه جام، جهت اطمینان از آزاد شدن نیروهای تنشی درونی آن عملیات تنش‌زدایی حرارتی بر روی محصول انجام می‌گیرد. پس از انجام این عملیات، محصول به راحتی قابل برش می‌باشد. فرآیند تنش‌زدایی حرارتی شیشه جام در محفظه‌های احتراق با گاز طبیعی یا کوره‌های الکتریکی که گرمخانه یا لهر<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند، انجام می‌گیرد (شکل ۱-۹). در عملیات تنش‌زدایی شیشه جام، مراحل زیر به ترتیب در لهر صورت می‌گیرد:

- شیشه جام شکل داده شده، تا بالای دمای تنش‌زدایی (حدود  $1050^{\circ}\text{F}$  -  $1000$  برای شیشه‌های سودا - آهکی) حرارت داده می‌شود و تا خارج شدن تنش‌های پس‌ماند در آن دما نگه داشته می‌شود.

- شیشه تا رسیدن به دمای محیط به آرامی سرد می‌شود تا از عدم ایجاد اختلاف دمای زیاد بین سطوح داخلی و خارجی شیشه اطمینان حاصل شود.
- جهت اطمینان از ثبات عملیات تنش‌زدایی، دمای لهر بصورت یکنواخت نگه داشته می‌شود.



شکل (۱-۹): عملیات پس از شکل‌دهی و تنش‌زدایی حرارتی شیشه جام در لهر

تنش‌زدایی یکنواخت شیشه در لهرهای مدرن با تجهیزات بهبود کارایی انرژی همراه شده است. این لهرها به خوبی ناحیه‌بندی شده‌اند و دارای منابع حرارتی خاص در هر ناحیه بوده و اکثر آنها از گردش مجدد هوای گرم در نواحی مختلف و بازیافت حرارت اتلافی در رکوپراتور استفاده می‌کنند. در برخی موارد که دمای شیشه ورودی به لهر بیش از دمای موردنیاز تنش‌زدایی حرارتی می‌باشد، لهرها بدون انرژی اضافی ورودی عمل می‌کنند. با این وجود اکثر لهرها با گاز طبیعی یا برق کار می‌نمایند. لهرهای الکتریکی تمیزتر بوده و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در آنها کمتر می‌باشد اما نیاز به توان الکتریکی بالایی داشته و به تبع آن دارای هزینه بهره‌برداری آنها بخصوص در هنگام پیک تقاضای برق، بیشتر می‌باشد. در حال حاضر از لهرهای الکتریکی برای عملیات تنش‌زدایی حرارتی در شیشه‌های ویترونی، شیشه‌های ایمنی و شیشه جلوی برخی اتومبیل‌ها استفاده می‌شود.

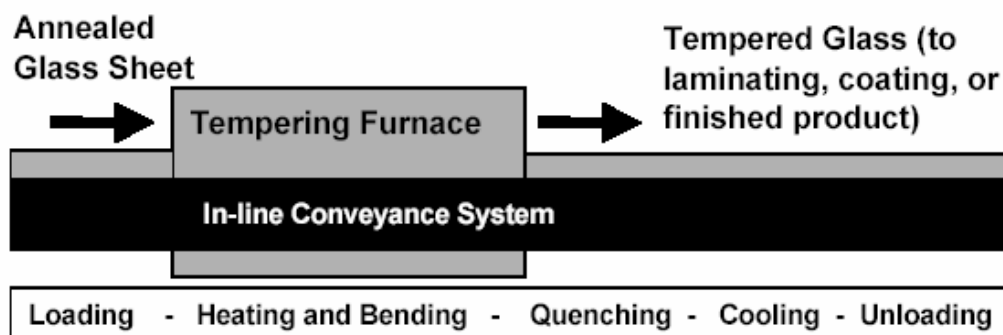
لهرهایی که سوخت مصرفی آنها گاز طبیعی است، عملکرد دقیقی داشته و استفاده از آنها بسیار متداول می‌باشد. اما لهرهای مذکور نیازمند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری نیز می‌باشند. لازم بذکر است که اکثر لهرها (بیش از ۹۰ درصد) با گاز طبیعی کار می‌کنند.

## ۹-۲-۲- عملیات حرارتی سختی‌دهی

بعد از عملیات تنش‌زدایی حرارتی، بعضی از انواع شیشه‌های جام بخصوص شیشه اتومبیل‌ها و برخی شیشه‌های نمای ساختمانها تحت عملیات حرارتی سختی‌دهی قرار می‌گیرند. در داخل کوره عملیات سختی‌دهی، چندین فرآیند انتقال حرارتی اتفاق می‌افتد که مهمترین آنها فرآیند حرارتی تشعشعی بین شیشه و سطوح داغ مانند المانهای حرارتی، غلتکها، جداره‌ها و کف می‌باشد. دیگر فرآیند مهم، انتقال حرارت هدایتی بین شیشه و سیستم انتقال دهنده محصولات است. همچنین انتقال حرارت به

صورت جابجایی طبیعی از آتمسفر فضای داخل کوره به شیشه و انتقال حرارت تشعشی با شیشه نیز اتفاق می‌افتد.

در طول فرآیند سختی‌دهی، ورق شیشه به صورت جداگانه توسط یک سیستم نقاله (از نوع زبانه‌ای، غلتکی و یا سیستم شناور با هوا یا گاز) و یا یک سیستم ردیفی نگه داشته می‌شود (شکل ۲-۹). سیستم‌های ردیفی شامل بارگذاری<sup>۱</sup>، حرارت دادن و خمش، سرد کردن ناگهانی<sup>۲</sup>، خنک کردن و بخش‌های بارگیری<sup>۳</sup> هستند. این سیستم‌ها ممکن است به صورت دائم و پیوسته و یا بچ عمل نمایند. شیشه جامی که باید خم گردد، تنها می‌تواند در سیستم بچ تحت عملیات حرارتی سختی‌دهی قرار گیرد.



شکل (۲-۹): عملیات حرارتی سختی‌دهی شیشه جام

### ۳-۲-۹- خم کردن

شیشه‌هایی که جهت استفاده به عنوان پنجره درب‌های اتومبیل، شیشه‌های کنار و عقب و همچنین شیشه‌های جلوی اتومبیل تولید می‌شوند، ممکن است قبل از انجام عملیات حرارتی سختی‌دهی به عملیات خم کاری هم نیاز داشته باشند. در این فرآیند، شیشه حرارت دیده در کوره خمکاری، به شکل مورد نظر خم می‌شود و سپس به سرعت سرد می‌گردد.

حفظ دمای مناسب هنگام انجام عملیات حرارتی سختی‌دهی، نقش اساسی داشته و بطور دقیقی بر حسب میزان حرارت ورودی و سرعت حرکت سیستم نقاله کنترل می‌شود. تنها در یک محدوده دمایی خاص، عملیات حرارتی سختی‌دهی محصول شیشه‌ای به درستی انجام می‌پذیرد. غیریکنواخت شدن دما و تغییر شکل شیشه از جمله معایبی است که ممکن است در اثر بروز برخی مشکلات در سیستم انتقال و مکانیزم‌های حرارت دهی یا سرد کردن ناگهانی بوجود آید. به عنوان مثال زبانه‌های سیستم نقاله ممکن است لبه شیشه را خراب کرده و پروفیل نامناسب دمای شیشه نیز ممکن است اصطلاحاً به شکم دادن شیشه در فاصله بین دو غلتک سیستم نقاله منجر شود. حتی با وجود منابع حرارتی کاملاً یکنواخت نیز ممکن است عدم یکنواختی در گرمایش بعثت

- 
- 1- Loading
  - 2- Quenching
  - 3- Unloading

اثر لبه های گرم<sup>۱</sup> بوجود آید. این اثر بعلت دریافت حرارت تشعشعی توسط لبه ها و سطوح ورق شیشه ای بوجود می آید که باعث افزایش بسیار زیاد دمای لبه ها نسبت به بخشهای میانی شیشه می گردد. برای کنترل این پدیده و تثبیت یکنواختی دما، لهرها را با دقت با المانهای حرارتی تجهیز نموده و از سیستم گردش اجباری هوا در لهرها استفاده می شود.

#### ۴-۲-۹- لایه گذاری

عملیات لایه گذاری ورق های شیشه ای، برای کاربردهایی نظیر شیشه های اتومبیل و نمای ساختمانی بکار می رود. قبل از انجام فرآیند لایه گذاری، ورق های شیشه ای تنش گیری شده، به اندازه مورد نظر بریده و شسته می شود. اگر شیشه خم شده است (مانند شیشه جلو اتومبیل) عمل لایه گذاری بدون انجام عملیات حرارتی سختی دهی صورت می گیرد. هنگام لایه گذاری، دو لایه از شیشه خم شده در اطراف یک لایه از رزین پلی وینیل بوتیرال<sup>۲</sup> قرار داده می شوند. هوای محبوس بین لایه ها با عبور شیشه از میان یک جفت غلتک لاستیکی خارج می شود. سپس لایه های شیشه در داخل یک اتوکلاو تحت فشار ۱۵۰ psi و دمای ۳۰۰ °F قرار می گیرند. در این دما و فشار، لایه داخلی به صورت یک مایع ویسکوز درمی آید و حباب های هوای باقیمانده بین لایه ها را در خود حل می نماید. بعد از خنک کردن، محصول لایه گذاری شده برای سنگ زنی لبه ها یا در صورت نیاز برای شستشو فرستاده می شود.

#### ۵-۲-۹- پوشش دهی

بعضی مواقع فرآیند پوشش دهی شیشه های جام به منظور دستیابی به برخی خواص ویژه مورد نیاز می شود. یک نمونه از این خواص، ایجاد ضریب گسیلندگی پایین<sup>۳</sup> در شیشه برای کاربردهای ساختمانی است. شیشه های با ضریب گسیلندگی پایین، با فلزاتی که تشعشع حرارتی را (به سمت داخل اتاق) بازتاب می کند، پوشش داده می شوند تا تلفات حرارتی در زمستان به حداقل برسد.

#### ۳-۹- تنش زدایی و پوشش دهی محصولات شیشه ای مطروف

کلیه محصولات شیشه ای مطروف بعد از فرآیند شکل دهی، در فرآیندی مشابه آنچه که برای شیشه های جام بکار می رود، تنش زدایی می شوند. مشکلات حفظ دمای یکنواخت در طول فرآیند تنش زدایی، برای محصولات شیشه ای مطروف نیز مشابه با شیشه جام وجود دارد. در محصولات شیشه ای مطروف، مشکل غیریکنواختی دما بعلت تغییرات زیاد در ضخامت و وزن قسمت های مختلف محصول شیشه ای پدید می آید. پیچیدگی شکل محصول و گرادیانهای بوجود آمده در دمای آن هنگام شکل دهی نیز موجب عدم یکنواختی دما می شوند.

در همه انواع محصولات شیشه ای مطروف باید میزان تنشهای فشاری سطح خارجی به منظور افزایش استحکام و کاهش پتانسیل شکستن محصول، تقلیل یابد. به منظور حذف گرادیانهای دمایی و تنش های موجود در شیشه های مطروف، ابتدا این محصولات در دمای ثابتی (دمای آنیلینگ) حرارت دهی می شوند. بعد از مرحله

1- Hot Edge

2- PVB: Poly Vinyl Butyral

3- Low Emissivity

حرارت دهی یکنواخت، ظروف شیشه‌ای به آرامی و با نرخ ثابتی خنک می‌شوند به گونه‌ای که همچنان در محدوده مجاز دمای آنیلینگ قرار داشته باشند. پس از آن، نرخ سرد کردن محصول تا حدی که منجر به شکستن آن نشود، افزایش می‌یابد. ضخامت قسمت‌های مختلف محصولات شیشه‌ای مظروف و شکل‌های آنها بطور قابل توجهی متغیر هستند. به همین ترتیب مشخصات و پارامترهای فرآیند تنش زدایی نیز در آنها متفاوت می‌باشد. این مشخصات اغلب توسط تجارب فنی کارگران و مهندسان مجرب از شرایط حرارتی در طول تنش زدایی هر یک از محصولات تولیدی تعیین می‌شود. میزان تنش باقیمانده و الگوی آن در محصول نهایی باید به منظور نظارت و کنترل بر فرآیند بطور متناوب بررسی شود.

اکثر شیشه‌های مظروف برای حداقل‌سازی خراش‌های سطحی پوشش دهی می‌شوند. پوشش مقاوم به خراشیدگی، شامل لایه نازک و تقریباً بی‌رنگی از اکسید تیتانیوم یا قلع است که روی سطح شیشه نشانده می‌شود. لایه اکسید تیتانیوم یا قلع، در مرحله بعد بوسیله مواد نرم کننده‌ای مانند پلی اتیلن پوشانده می‌شود. پوشش‌های مذکور بر روی ظروف شیشه‌ای، تحت تأثیر فرآیندهای خارجی نظیر پاستوریزاسیون آسیب نمی‌بینند. این پوشش‌ها هر دو سطح داخلی و خارجی محصولات شیشه‌ای مظروف را در بر می‌گیرد.

#### ۴-۹- تنش‌زدایی محصولات تولیدی به روش پرس - دمشی

عملیات حرارتی تنش‌زدایی در اکثر محصولات شیشه‌ای مظروف که از فرآیند پرس - دمشی تولید می‌شوند، به روش مشابه فرآیند دمشی - دمشی صورت می‌گیرد. اگرچه شرایط خاص عملیاتی در آنها می‌تواند بسیار متفاوت باشد. عملیات حرارتی سختی دهی بر روی محصولات شیشه‌ای تولیدی به روش پرس - دمشی معمولاً فقط در مورد صفحات شیشه فر اجاق گاز و یا برخی محصولات شیشه‌ای خاص مانند لنزهای اپتیکی انجام می‌گیرد.

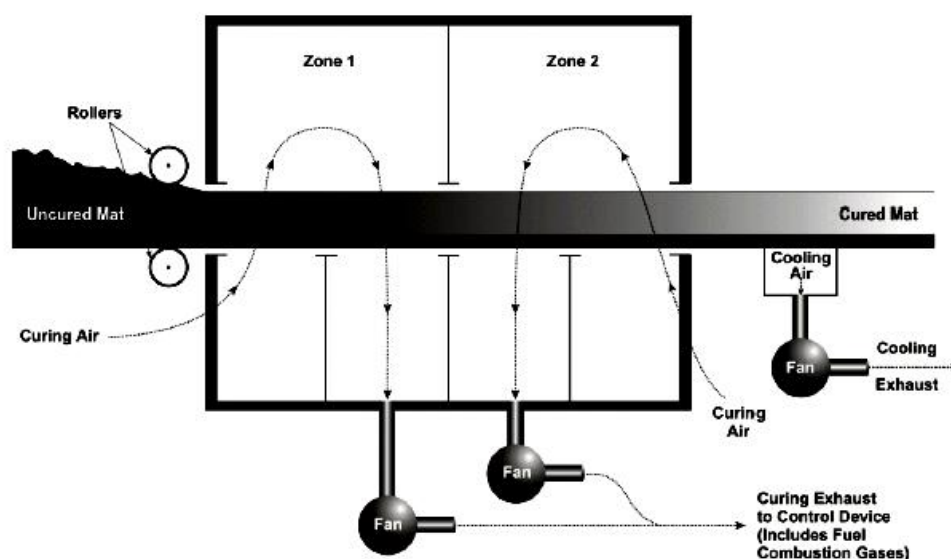
عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر روی شیشه‌های اپتیکی، ترمومترها و سایر محصولات شیشه‌ای خاص طی فرآیندهای بسیار دقیقی انجام می‌گیرند. بعد از تنش‌زدایی، ممکن است برای دستیابی به ویژگی‌های عملکردی مطلوب، عملیات حرارتی بیشتری انجام پذیرد. مثلاً در مورد شیشه‌های اپتیکی، یک عملیات تنش‌زدایی نهایی نیز برای اطمینان از یکنواختی ضریب شکست نور در محصول انجام می‌گیرد.

#### ۵-۹- ورز دادن حرارتی و خشک کردن الیاف شیشه‌ای

در انتهای فرآیند شکل‌دهی، الیاف پشم شیشه بوسیله محلول آبی و چسبناک فنولیک اسپری شده و سپس بر روی یک تسمه نقاله بصورت در هم رفته و حصیر مانند جمع‌آوری می‌شوند. در ادامه، الیاف جمع‌آوری شده وارد یک کوره بزرگ یا مجموعه‌ای از کوره‌های کوچکتر می‌گردد که در آنها محلول چسبناک، ورز آمده و خشک می‌شود. در این مرحله محدوده دما  $900^{\circ}\text{F}$  -  $350^{\circ}\text{F}$  و بطور متوسط حدود  $600^{\circ}\text{F}$  می‌باشد که بستگی به ضخامت عایق پشم شیشه تولیدی دارد. هنگام عملیات خشک کردن، گازهای فنلیک متصاعد می‌گردد که سوزانده می‌شوند. بعد از مرحله خشک کردن، نوار پشم شیشه تولیدی از بخش خنک‌کاری بوسیله جریان هوای محیط عبور داده می‌شود (شکل ۳-۹). سپس لبه‌های ناصاف نوار پشم شیشه تولیدی، بر روی تسمه نقاله مرتب

شده و در برخی موارد نیز یک لایه پوششی (مثلا فویل) توسط چسب به پشم شیشه اضافه می‌شود. در نهایت نیز نوار پشم شیشه به ابعاد مورد نظر عایق برش خورده و محصول نهایی بسته بندی می‌شود.

الیاف شیشه‌ای مورد استفاده در نساجی پس از شکل‌دهی، روی غلتک‌هایی کشیده شده و پوشش دهی می‌شوند. سپس الیاف پوشش دهی شده، روی قرقره‌ها یا دوک‌هایی پیچیده می‌شوند و به سمت کوره خشک کن ارسال می‌گردند. در کوره خشک‌کن، رطوبت موجود در مواد پوششی خارج می‌شود. بعد از خشک شدن، دوک‌ها به کوره‌ای جهت ورز دادن حرارتی مواد پوششی منتقل می‌شوند. در مرحله نهایی، ممکن است الیاف پیچیده، بافته یا به هر شکل مورد نظری در محصول نهایی آماده و سپس بسته بندی شوند.



شکل (۳-۹): کوره خشک کن الیاف پشم شیشه

#### ۹-۶- بسته‌بندی و حمل و نقل محصولات شیشه‌ای

با تکمیل عملیات پس از شکل‌دهی، محصول نهایی به صورت مشاهده‌ای، اپتیکی یا مکانیکی مورد بازرسی و کنترل قرار گرفته و انحرافات ابعادی و مشکلات مختلف ظاهری آن (مانند ترک خوردگی، خراش و سایر خرابی‌ها) بررسی می‌گردد. بطری‌های استوانه‌ای ممکن است جهت آزمون استحکام در برابر فشار، در مقابل تسمه‌ها یا غلتک‌های لاستیکی قرار گرفته و یا با استفاده از فشار هوای داخلی تست شوند.

بعد از بازرسی، محصولات پذیرفته شده در واحد کنترل کیفیت، به قسمت بسته‌بندی منتقل می‌شوند. محصولات شکسته یا معیوب در صورتی که آلوده نشده باشند مستقیماً به عنوان شیشه خرده به بچ برگشت داده می‌شوند تا دوباره ذوب شوند.

#### ۹-۷- انرژی مورد نیاز



مقدار انرژی مصرفی در عملیات پس از شکل‌دهی محصولات معمولاً در حدود ۱۷ - ۱۳ درصد از کل انرژی مصرفی است. کمترین مقدار مصرف انرژی در عملیات پس از شکل‌دهی مربوط به تولید محصولات شیشه‌ای مظلوف است و در مقابل بیشترین مقدار مصرف انرژی در عملیات پس از شکل‌دهی، به تولید شیشه جام اختصاص دارد. جدول (۹-۱) مقادیر انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات پس از شکل‌دهی را در انواع محصولات شیشه‌ای نشان می‌دهد.

مقدار مصرف ویژه انرژی در عملیات حرارتی تنش‌زدایی شیشه جام در حدود  $500 - 1000 \text{ Btu/ft}^2$  است، که مقدار متوسط مصرف ویژه انرژی در این بخش برابر  $10^6 \times 0.42 \text{ Btu}$  به ازای هر تن شیشه می‌شود. فرآیند اتوکلاو ورقه‌های شیشه‌ای هنگام عملیات لایه‌گذاری به طور متوسط نیازمند  $10^6 \times 0.68 \text{ Btu}$  به ازای هر تن شیشه است که اکثر بوسیله انرژی الکتریکی تأمین می‌گردد.

در حدود ۱۰ درصد از کل انرژی مصرفی در فرآیند تولید الیاف شیشه‌ای مورد استفاده در نساجی صرف ورزدادن حرارتی و خشک کردن می‌شود. این بخش حدود ۱۲ درصد از کل انرژی مصرفی در تولید پشم شیشه را به خود اختصاص می‌دهد. ورزدادن حرارتی و خشک کردن الیاف پشم شیشه حدود  $470 - 588 \text{ Btu/lb}$  انرژی به مصرف می‌رساند. سوزاندن بخارات فنولیک متصاعد شده از فرآیند تولید پشم شیشه نیز در حدود  $588 \text{ Btu/lb}$  انرژی به مصرف می‌رساند.

جدول (۹-۱): مصرف انرژی در عملیات پس از شکل‌دهی

کل انرژی ( $10^6 \text{ Btu/ton}$ )	انرژی الکتریکی <sup>۱</sup> ( $10^6 \text{ Btu/ton}$ )	گاز طبیعی/مازوت ( $10^6 \text{ Btu/ton}$ )	حامل انرژی
			<b>شیشه جام</b>
0.42	0.01	0.41	• عملیات حرارتی تنش زدایی
4.20	0.19	4.01	• عملیات حرارتی سختی دهی (با سوخت گاز طبیعی)
1.85	1.85	-	• عملیات حرارتی سختی دهی (الکتریکی)
0.96	-	0.96	• لایه گذاری
0.68	0.14	0.54	• اتوکلاو
1.86	0.23	1.63	<b>شیشه مظلوف<sup>۲</sup> (فرآیند دمشی - دمشی)</b>
3.0	0.05	2.95	<b>شیشه مظلوف<sup>۳</sup> (فرآیند پرس - دمشی)</b>
			<b>الیاف شیشه ای</b>
4.38	-	4.38	• پشم شیشه
3.28	-	3.28	• الیاف نساجی

۱- بر مبنای ضریب تبدیل الکتریکی معادل  $3412 \text{ Btu/KWh}$ .

۲- شامل عملیات حرارتی تنش زدایی و پرداخت نهایی.

۳- شامل عملیات حرارتی تنش زدایی و پرداخت نهایی (توسط شعله).

