

فصل هشتم

شکل دهی شیشه

۸-۱- کلیات فرآیند شکل دهی^۱

شکل دهی مرحله‌ای از فرآیند تولید شیشه است که در آن شیشه مذاب به شکل نهایی خودش تبدیل می‌گردد. در زمانی که شیشه مذاب از مخزن ذوب تا ماشین آلات شکل دهنده در حرکت است به شکل یک خمیر بسیار غلیظ به رنگ قرمز - نارنجی است. شیشه مذاب بلافاصله بعد از خنک شدن، سفت و سخت می‌گردد بنابر این در فرآیند شکل دهی باید به سرعت شیشه مذاب را قالب گیری کرده و شکل دهند. فرآیندهای شکل دهی فراوانی وجود دارد. شیشه مذاب می‌تواند قالب گیری شود، کشیده شود، غلتانیده شود، ریخته‌گری شود، دمیده شود، فشرده گردد و یا در داخل فیبرها تنیده شود. صرف نظر از نوع فرآیند، شکل دهی با حرکت جریان مذاب شیشه از فورهارت^۲ آغاز می‌شود. در فورهارت دمای شیشه ذوب شده تا دمایی که بتوان به مذاب شیشه شکل داد، پایین آورده می‌شود. از این مرحله به بعد فرآیند شکل دهی بستگی به شکل نهایی محصول موردنظر دارد.

1- Forming
2- Forehearth

۸-۱-۱- فرآیند تولید شیشه جام

تولید شیشه جام به روش فلوت یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در تولید شیشه جام به شمار می‌آید. به گونه‌ای که تقریباً تمامی شیشه‌های جام در کشورهای پیشرفته به این روش تولید می‌شوند. این فرآیند در دهه ۱۹۵۰ میلادی، توسط برادران Pilkington در انگلیس ابداع و توسعه یافت. در سال ۱۹۶۲ امتیاز این روش توسط ایالت متحده آمریکا اخذ گردید و انقلابی در صنعت تولید شیشه جام ایجاد نمود و امروزه به شکل گسترده‌ای به جای سایر فرآیندهای تولید شیشه جام که بسیار انرژی‌بر و دارای تلفات بالای تولید هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرآیند تولید شیشه جام به روش فلوت، انرژی بسیار کمتری نسبت به فرآیندهای دیگر تولید شیشه جام مصرف می‌کند. این امر بدلیل استفاده از کوره‌های کارآمدتر و بزرگتر و همچنین به علت حذف عملیات مربوط به پرداخت سطح^۱ (مثل صیقل کاری و سائیدن) است. انرژی مصرفی در عملیات پرداخت سطح می‌تواند به بیش از 3×10^6 Btu برای هر تن شیشه بالغ گردد.

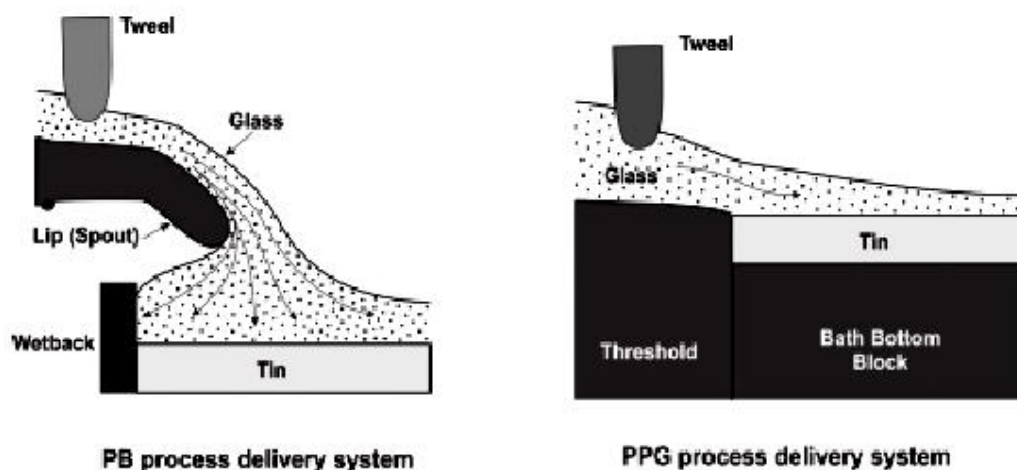
فرآیند تولید شیشه جام به روش فلوت، شیشه صیقلی شده‌ای را بوسیله حرارت (آتش^۲) ایجاد می‌کند که از لحاظ کیفیت بسیار مشابه صفحات صیقلی یافته شیشه‌ای حاصل از انجام عملیات پرداخت سطح است. از آنجاییکه فرآیند تولید به روش فلوت تقریباً برای تولید تمام شیشه‌های جام بکار می‌رود، امروزه عنوان شیشه جام (Flat) و روش تولید آن (Float) به جای یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در فرآیند تولید شیشه جام به روش فلوت، شیشه مذاب (تقریباً در دمای 1950°F) به صورت افقی از فورهارت و از زیر یک دهانه^۳ و بالای یک مجرای ناودانی شکل^۴ جریان یافته و به داخل مخزنی (استخری) از قلع مذاب^۵ که طول آن معمولاً حدود ۱۹۰-۱۶۰ فوت و عرض آن حدود ۳۰-۱۲ فوت است، می‌ریزد. در زمانی که مذاب شیشه که سیالی داغ است بر روی سطح قلع مذاب عبور می‌کند، سطح بسیار صاف و صیقلی قلع مذاب به شیشه مذاب شکل داده و در نتیجه سطحی صاف با ضخامت مشخص ایجاد می‌شود.

فرآیند دیگری نیز بوسیله صنایع PPG در سال ۱۹۷۴ گسترش یافت. در این روش، شیشه مذاب بجای آنکه بر روی مجرای باریک ناودانی شکل جریان یابد، بر روی بستر پهنی که از جنس مواد غیر واکنش‌گر ساخته شده است، عبور داده می‌شود.

فرآیند PPG دارای این مزیت است که ابعاد استخر مورد نیاز قلع مذاب را کاهش می‌دهد و بدلیل ایجاد میزان سرعت مناسب برای مذاب شیشه، فرآیند مناسب‌تری برای شکل‌دهی نهایی شیشه جام محسوب می‌شود. شکل (۸-۱) فرآیندهای تولید شیشه جام به روش فلوت و PPG را بر روی بستر قلع مذاب نشان می‌دهد.

1- Finishing
2- Fire-Polishing
3- Tweel
4- Lip / Spout
5- Tin Pool / Tin Bath



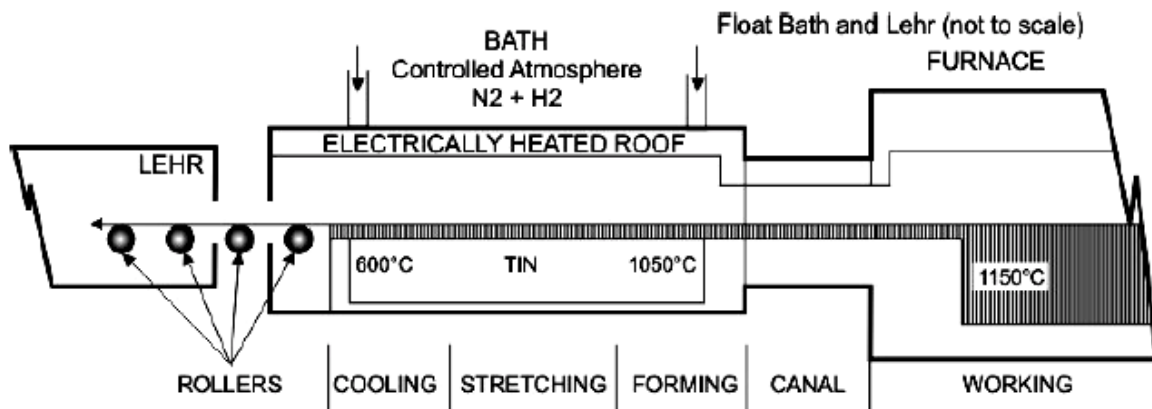
شکل (۸-۱): فرآیندهای تولید شیشه جام به روش فلوٹ و PPG بر روی بستر قلع مذاب

روش دیگر تولید شیشه جام، نورد مذاب خمیری شکل شیشه است. در این روش، غلتک‌ها از آلیاژهایی که دارای مقاومت حرارتی بسیار بالایی هستند، ساخته می‌شوند. شیشه جام تولید شده به این روش دارای سطح زبرتری می‌باشد. معمولاً از این غلتک‌ها برای اضافه کردن شکل یا طرح خاصی بر روی شیشه‌های جام استفاده می‌شود.

از انتهای محفظه ذوب، مذاب شیشه بطور پیوسته به سمت پایین دست فرآیند کشش و نورد شیشه کشیده می‌شود. شیشه مذابی که بوسیله اختلاط با مواد نسوز و دیرگداز ناخالص و کثیف شده باشد، به سمت گوشه و حاشیه محفظه فرستاده می‌شود تا از فرآیند تولید خارج گردد. در سرتاسر محفظه شناور شدن شیشه، نواحی مختلفی با درجه حرارت‌های متفاوت وجود دارد که سبب گرمایش، پرداخت حرارتی (صیقلی کردن)، کشیدن شیشه و شکل دادن به صفحات شیشه‌ای می‌گردد (شکل ۸-۲).

حمام قلع در زیر پوششی از گاز نیتروژن (گاز خنثی) نگهداری می‌شود تا از اکسیداسیون آن جلوگیری شود. قلع نیز همیشه در حالت مذاب نگه داشته می‌شود، که این امر بوسیله گرم‌کن‌های الکتریکی انجام می‌پذیرد. هر چه ضخامت شیشه تولیدی بیشتر باشد، مقدار گرمای کمتری مورد نیاز خواهد بود.

شیشه از روی بستری از قلع با دمای 1125°F خارج می‌گردد و به سمت فرآیند پرداخت (فرآیند نهایی) فرستاده می‌شود. ضخامت شیشه‌ای که بستر قلع را ترک می‌کند در محدوده $0.078 - 0.078$ اینچ است.



شکل (۲-۸): نواحی مختلفی با درجه حرارت‌های متفاوت در محفظه شناوری شیشه

۲-۱-۸- فرآیند تولید شیشه مظروف به روش قالبگیری

در تولید محصولات شیشه‌ای مظروف، شیشه مذاب با وارد شدن در داخل قالب‌های مخصوص، شکل می‌گیرد. رایج‌ترین روش انجام این کار بدین صورت است که شیشه مذاب را با فشار از سوراخ‌های کوچکی عبور می‌دهند و بدین ترتیب مذاب خمیری شکل شیشه به صورت لقمه‌هایی در اندازه‌های دلخواه در می‌آید. سپس لقمه‌های حاصله را به داخل محفظه‌های قالبگیری می‌فرستند. به این روش، روش تزریق لقمه شیشه^۱ می‌گویند. وزن و شکل لقمه‌های مذاب شیشه بوسیله یک اورفیس و قیچی مکانیکی کنترل می‌شود. پس از خروج مذاب از اورفیس و شکل‌گیری قطر لقمه مذاب، با استفاده از قیچی‌های مکانیکی، مذاب خمیری شکل خروجی از اورفیس (به شکل پیوسته) در اندازه‌های لازم بر حسب محصول تولیدی بریده می‌شود. محدوده دمایی لقمه‌ها $1800 - 2250^{\circ}\text{F}$ می‌باشد.

درجه حرارت شیشه مذاب برای شکل‌دهی لقمه‌های مذاب بسیار پراهمیت است. چنانچه دمای شیشه مذاب بسیار پایین باشد در نتیجه بسیار غلیظ بوده و لذا انتقال آن به شکل مناسبی صورت نمی‌گیرد. ازسوی دیگر ممکن است سیستم‌های سرمایش به منظور حذف تغییرات دمایی لقمه‌های مذاب مورد استفاده قرار گیرند. بنا بر این با توجه به موارد مذکور دمای فوره‌ها^۲ باید بسیار دقیق تحت کنترل قرار گیرد (فصل چهارم). امروزه تولید اتوماتیک انواع محصولات شیشه‌ای مظروف از لقمه‌های مذاب در تقریباً تمامی کارخانجات تولید شیشه مظروف توسط ماشین IS^۲ (بخش‌های مجزا) صورت می‌گیرد. هر بخش از ماشین IS شامل یک سری از قالب‌های مخصوص به خود است که مستقل از دیگر ماشین‌های IS به تولید می‌پردازد. هر قسمت از ماشین IS می‌تواند به طور مجزا و بدون مختل کردن کار بقیه ماشین‌ها خاموش شده و یا تحت تعمیر و تعویض قطعات قرار گیرد.

1- Gob Feeding
2- Individual Section

ماشین‌های IS می‌توانند تعداد زیادی از انواع محصولات شیشه‌ای با ابعاد مختلف و شکل‌های متفاوت را تحت قالب‌گیری‌های متنوع قرار دهند. همچنین قادرند محصولات شیشه‌ای مظروف را با نرخ بیش از ۱۰۰ عدد در دقیقه تولید نمایند.

یک ماشین IS می‌تواند به طور یکسان ۱۰ قسمت قالب گیر مذاب را بکار گیرد. این ۱۰ قسمت در یک مکان قرار دارند و یک توزیع کننده لقمه مذاب نیز بر روی آنها قرار دارد که لقمه مذاب را به طور یکنواخت در داخل قالب‌ها توزیع می‌کند.

از سوی دیگر ماشین‌های IS می‌توانند در هر قسمت بطور همزمان ۱، ۲، ۳ و یا حتی ۴ سری از قالب‌های شیشه را بکار گیرند (قالب‌های تکی، دوگانه، سه گانه و چهارگانه). به عنوان مثال در صورتی که هر قسمت از ماشین IS شامل دو سری قالب شیشه باشد، می‌تواند در هر دور ۲ عدد بطری تولید نماید. از قالب‌های دوگانه می‌توان برای تولید ظروف شیشه‌ای تا وزن ۲۰ اونس استفاده نمود. در صورت تغذیه سه گانه لقمه مذاب و بهره‌گیری از قالب‌های سه گانه می‌توان در هر دور سه ظرف شیشه‌ای به وزن هریک تا ۱۰ اونس تولید نمود.

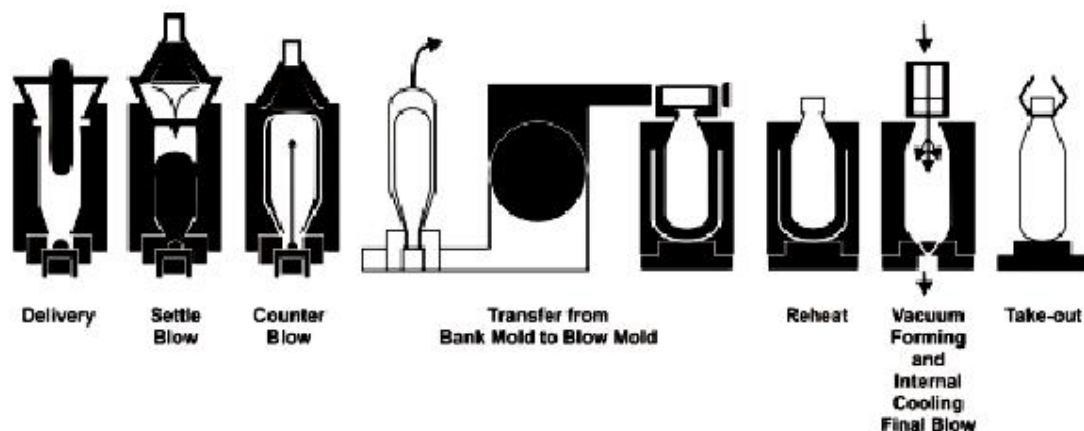
ماشین‌های ۲، ۳ یا ۴ قالبه دارای این مزیت هستند که سرعت تولید ظروف شیشه‌ای در آنها افزایش چشمگیری می‌یابد. همچنین بهره‌وری تولید در ماشین‌های بزرگتر بیشتر است. برای مثال ماشین IS ارائه شده توسط شرکت Owens Illinois ده سری قالب چهارگانه است که می‌تواند بیش از ۵۰۰ بطری در هر دقیقه تولید کند. بطور کلی دو روش تولید در ماشین‌های IS مورد استفاده قرار می‌گیرد، که عبارتند از روش دمشی - دمشی^۱ و روش پرس - دمشی^۲. ماشین‌های IS می‌توانند به لقمه مذاب شیشه به هر دو روش فوق شکل دهند. همچنین این امکان در ماشین‌های IS وجود دارد که به راحتی به هر یک از دو روش فوق تغییر یابند. این امر باعث انعطاف پذیری بیشتر در تولید و افزایش بهره‌وری تولید می‌گردد.

در روش دمشی - دمشی، لقمه مذاب ابتدا به قالب‌های خالی فرستاده می‌شوند و سپس بوسیله هوای فشرده در داخل قالب‌ها جاسازی می‌گردند. پس از دمش اولیه، هوای فشرده از پایین برای شکل‌دهی ابتدایی ظروف شیشه‌ای در داخل قالب اولیه دمیده می‌شود. سپس خمیر شیشه که تا حدودی به شکل کلی محصول در آمده است، به قسمت قالب دمشی دوم فرستاده می‌شود که در آنجا شکل نهایی شیشه مظروف بوسیله هوای فشرده ایجاد می‌گردد. فرآیند فوق‌الذکر در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. کنترل ابعاد ظروف شیشه‌ای تولیدی در این روش نسبتاً خوب بوده و همچنین یک سطح پرداخت شده بسیار با کیفیت نیز بدست می‌آید که به مراتب آسانتر از روش تولید پرس - دمشی است.

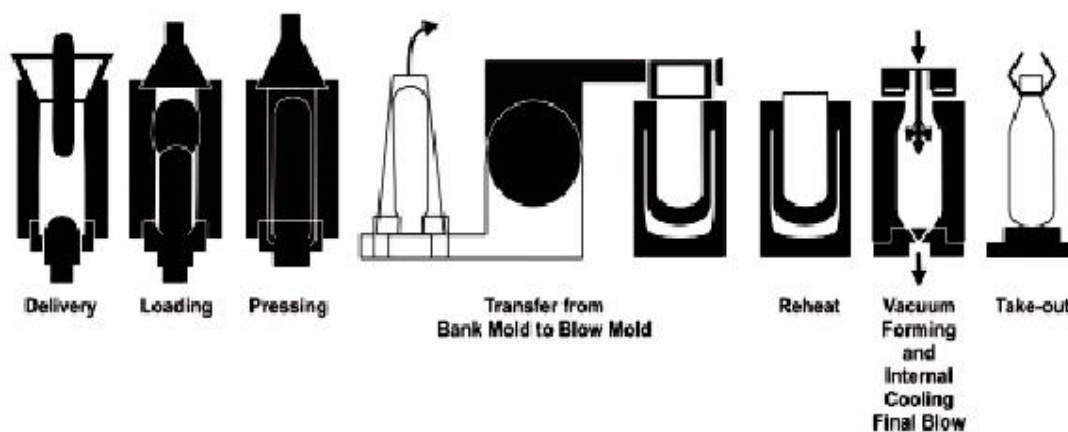
در روش پرس - دمشی، از یک سنبه^۳ برای شکل دهی اولیه لقمه مذاب در داخل قالب استفاده می‌شود (شکل ۴-۸). سپس خمیر شیشه‌ای که تا حدودی به شکل کلی محصول در آمده است، وارونه شده و به قالب دمشی منتقل می‌شود که در آنجا تحت تأثیر خلاء یا فشار هوا قرار می‌گیرد تا شکل نهایی را به خود بگیرد. قالب پرس معمولاً دارای دیواره ضخیم بوده ولی کوچکتر از قالب دمشی نهایی است. نسبت به روش تولید دمشی - دمشی، در روش تولید پرس - دمشی کنترل ابعاد محصول با دقت بیشتری صورت می‌گیرد. از سوی دیگر

1- Blow and Blow
2- Press and Blow
3- Plunger

قالب‌گیری ظروف شیشه‌ای با سطح مقطع ضخیم تر نیز به این روش امکان پذیر است. تمامی قالب‌ها باید در درجه حرارت ثابتی نگهداری شوند تا کیفیت مورد نظر محصول شیشه‌ای حاصل گردد.



شکل (۳-۸): شکل‌دهی محصولات شیشه‌ای مظروف به روش دمشی - دمشی



شکل (۴-۸): شکل‌دهی محصولات شیشه‌ای مظروف به روش پرس - دمشی

محصولات شیشه‌ای تولیدی به روش پرس - دمشی بر حسب نوع عملیات بکار رفته برای شکل‌دهی، بسیار متنوعند. این محصولات شامل محصولات شیشه‌ای دست ساز و ماشینی از قبیل محصولات هنری و تزئینی، ظروف آشپزخانه، لوازم روشنایی، محصولات شیشه‌ای الکترونیکی، لامپ تصویر تلویزیون و شیشه‌های صنعتی و آزمایشگاهی می‌باشند.

× ظروف آشپزخانه، محصولات هنری و تزئینی

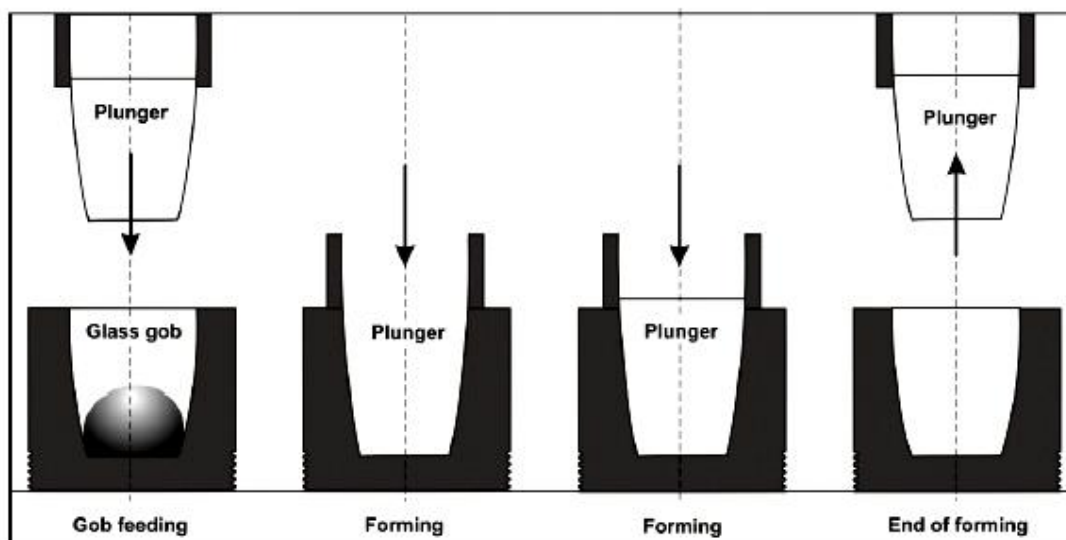
بیشترین سهم محصولات شیشه‌ای تولیدی به روش پرس - دمشی شامل ظروف آشپزخانه و محصولات هنری و تزئینی می‌باشد. بیشتر محصولات مذکور (در حدود ۸۵٪) بوسیله ماشین‌آلات اتوماتیک تولید می‌گردند. برخی از محصولات شیشه‌ای مظروف یا ظروف آشپزخانه بوسیله ماشین‌های مکانیکی و بر اساس شکل‌دهی پرس^۱ تولید می‌گردند. در شکل‌دهی پرس از یک قالب، سنبه و یک رینگ برای شکل‌دهی نهایی استفاده می‌شود (شکل ۵-۸). قالب‌های مورد استفاده در روش شکل‌دهی پرس، اکثراً از جنس چدن ریخته‌گری و در بعضی از موارد از فولادهای ضد زنگ و یا مواد دیگر ساخته می‌شوند. ظروف شیشه‌ای ساده (کاسه ها و بشقاب ها) نیز اغلب بروش پرس ساخته می‌شوند.

فرآیند شکل‌دهی محصول در ماشین‌های پرس، یک مرحله‌ای بوده و در آنها از یک سنبه که معمولاً در قالب‌های مختلف عمل شکل‌دهی را انجام می‌دهد، استفاده می‌شود. میز کار ماشین‌های شکل‌دهی پرس بوسیله موتور الکتریکی و یا هوای فشرده به حرکت در می‌آیند و مکانیزم پرس نیز بوسیله سیلندرهای هوای فشرده و یا بازوهای مکانیکی انجام می‌شود. سرعت تولید در روش شکل‌دهی پرس متفاوت است و در محدوده بین ۶۰-۱۰ محصول در هر دقیقه می‌باشد. سرعت تولید به زمان مورد نیاز برای خنک کاری شیشه و زمان پرس‌کاری آن بستگی دارد. قطعات فرم داده شده می‌تواند به صورت دستی و یا اتوماتیک از ماشین خارج شوند. روش خارج‌سازی محصولات تولیدی از ماشین آلات شکل‌دهی پرس می‌تواند بوسیله جت‌های هوا، ایجاد خلأ (مکش)، انبرک‌های^۲ اتوماتیک، برگرداندن قالب و روش‌های دستی صورت پذیرد.

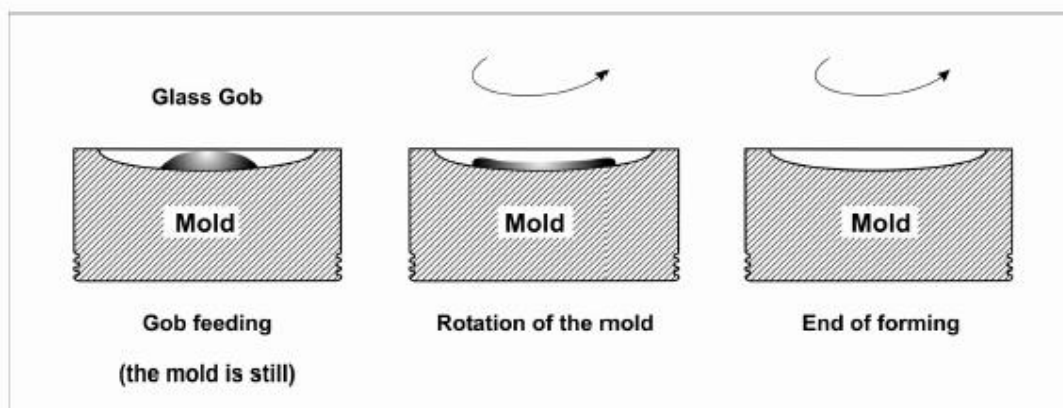
از آنجاییکه در شکل‌دهی پرس از قالب‌های بسیار گرم استفاده می‌شود، میزان درجه حرارت قالب‌ها باید بسیار دقیق تحت کنترل قرار گیرد تا از داغ شدن بیش از حد آنها و چسبندگی مذاب به داخل قالب جلوگیری شود. این عمل بوسیله فن‌ها و یا هوای فشرده انجام می‌شود. سنبه‌ها بوسیله گردش آب سرد از مابین جداره‌های داخلی آنها خنک می‌شوند. گاهی نیز برای جلوگیری از اثرات اصطکاک و چسبندگی مذاب، به داخل قالب‌ها آب و یا روغن خنک کننده اسپری می‌شود.

فرآیند شکل‌دهی چرخشی^۳ گاهی اوقات برای تولید محصولات مدور مانند بشقاب و یا ظروف کم عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۶-۸). در این روش ابتدا یک تکه از لقمه مذاب شیشه در داخل قالب انداخته می‌شود. سپس لقمه مذاب بوسیله نیروی گریز از مرکز که در اثر چرخش سریع قالب ایجاد می‌شود، شکل‌دهی می‌شود.

1- Press - Forming
2- Tongs
3- Spinning Forming



شکل (۵-۸): شکل دهی پرس



شکل (۶-۸): شکل دهی چرخشی

× محصولات روشنایی و الکترونیکی

محصولات شیشه‌ای الکترونیکی و روشنایی از قبیل حباب لامپ، لامپ تصویر تلویزیون، مقاومت، خازن و غیره بوسیله انواع روش‌های دمشی، پرسی، پرسی - دمشی و همچنین تکنیک‌های ریخته‌گری^۱ و کششی^۲ تولید می‌گردند.

طرح ماشین‌های نواری اولین بار در سال ۱۹۲۲ توسط William Woods ارائه گردید که برای شکل‌دهی حباب لامپ‌های رشته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. تا قبل از زمان مذکور ماشین‌های موسوم به "E" و "F" که قادر به تولید ۱۰ تا ۴۲ حباب لامپ در هر دقیقه می‌باشند، رایج‌ترین ماشین آلات صنعتی به شمار می‌آمدند. ماشین نیمه اتوماتیک "E" برخی فعالیت‌های فرد شیشه‌گر را به صورت خودکار انجام می‌داد، با این وجود برای باز و بسته کردن قالب‌ها و حرکت دادن لوله دم شیشه‌گری^۳ همچنان نیازمند عمل اوپراتور بود.

ماشین تمام اتوماتیک "F" بطور کامل دخالت شیشه‌گر در تولید را منتفی ساخت. ایده William Woods تولید حباب‌های لامپ (یا سایر محصولات مشابه) به طور کاملاً اتوماتیک بوسیله فرستادن نواری از شیشه مذاب بر روی یک تسمه متحرک فولادی بود که حرکتی پیوسته داشت. بر روی تسمه فولادی سوراخ‌هایی تعبیه شده بود که بخش‌هایی از نوار شیشه مذاب در داخل آنها فرو رفته و سپس با دمش هوا به داخل هر یک، شکل نهایی حباب‌ها بدست می‌آمد. در سال ۱۹۲۶ ایده انقلاب وی در تولیدات تجاری مورد استفاده قرار گرفت و اولین ماشین نواری وی حدود ۲۵۰ حباب لامپ در هر دقیقه تولید نمود. در حال حاضر ماشین‌های مدرن نواری می‌توانند تا بیش از ۲۰۰۰ حباب در هر دقیقه تولید نمایند. همچنین از این ماشین‌ها برای تولید انواع دیگر حباب نیز استفاده می‌شود.

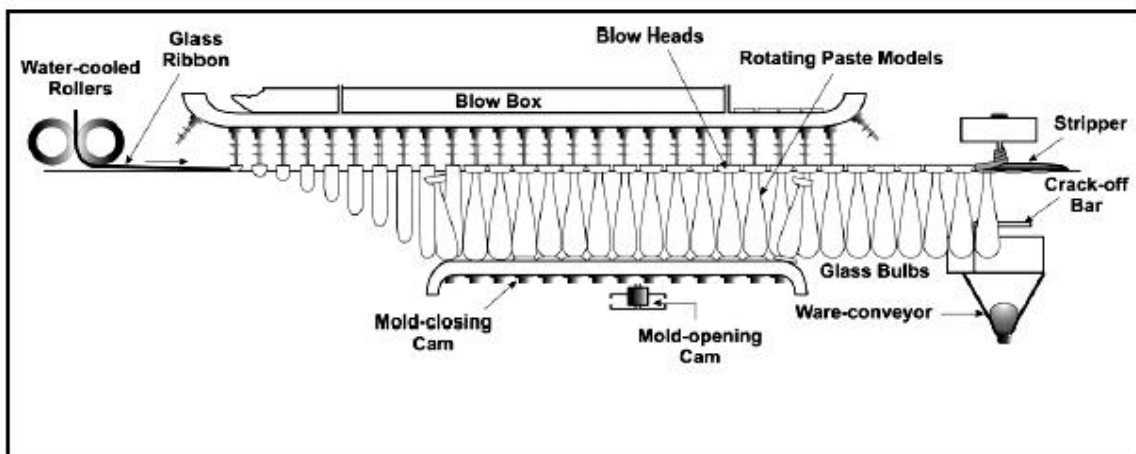
در فرآیند به روش ماشین نواری (شکل ۷-۸) جریان پیوسته‌ای از شیشه مذاب خروجی از فوره‌ارت در بین دو غلتک که بوسیله آب خنک کاری می‌شوند، در حرکت است. غلتک‌ها، مذاب شیشه را نورد کرده و آنرا به شکل یک نوار پهن در می‌آورند. سپس نوار مذاب شیشه بر روی تسمه‌ای متحرک فرستاده می‌شود که متشکل از زنجیره‌ای از صفحات فولادی است. بر روی صفحات فولادی سوراخ‌هایی تعبیه شده است که مذاب شیشه در داخل آنها اصطلاحاً شکم داده و شکل اولیه حباب‌ها را ایجاد می‌کند. در این قسمت بخش قابل ملاحظه‌ای از شیشه مذاب به داخل سوراخ‌ها هدایت شده و بخش باقیمانده نیز دوباره بازیافت می‌گردد.

همزمان با شکل‌گیری اولیه حباب‌ها در داخل سوراخ‌ها، تسمه دیگری نیز کاملاً مشابه تسمه حامل نوار شیشه مذاب در بالای آن حرکت می‌کند. این تسمه حاوی سر لوله‌های دمنده^۴ هوا است که در فواصل مشابهی مانند سوراخ‌های تسمه پایینی تعبیه شده‌اند و کار دمش مذاب را انجام می‌دهند. بدین ترتیب با دمش هوا به داخل قالب‌ها، حباب‌ها منبسط شده و شکل نهایی محصول را به خود می‌گیرند. بعد از دمیدن نهایی قالب‌ها باز می‌شوند و حباب‌ها از نوار شیشه جدا شده و خارج می‌گردند.

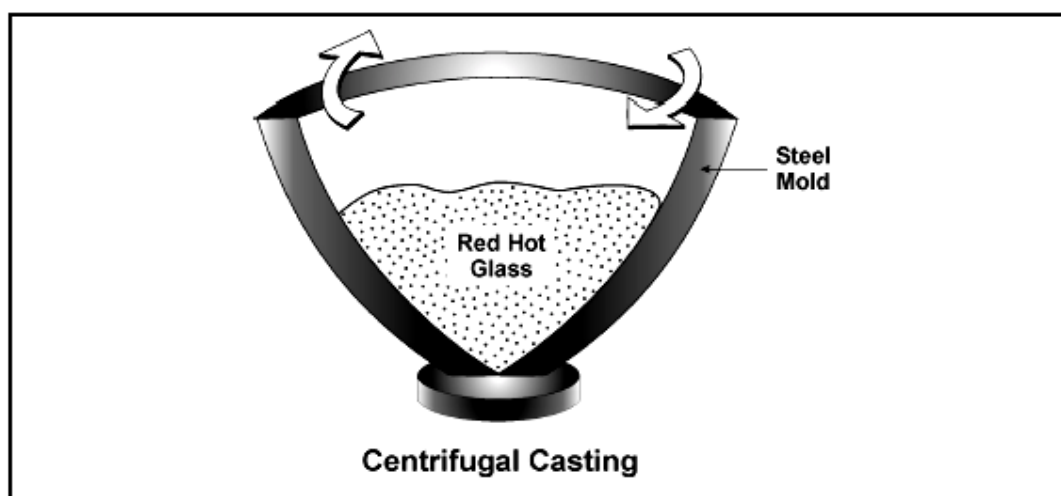
1- Casting
2- Drawing
3- Blowpipe
4- Blowing Tips

برای شکل دادن به قسمت‌های مخروطی شکل لامپ تصویر تلویزیون، یک فرآیند دو مرحله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا از یک فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز استفاده می‌شود که در آن شیشه مذاب به صورت لقمه بریده شده و داخل قالب‌های دوار چدنی انداخته می‌شود (شکل ۸-۸). سپس قالب با سرعت زیادی می‌چرخد به گونه‌ای که مذاب شیشه به طور یکنواختی به اطراف پخش شده و شکل داخلی قالب را به خود می‌گیرد.

صفحه شیشه‌ای تلویزیون و محصولات مشابه آن بوسیله ریخته‌گری لقمه‌های شیشه مذاب در قالب‌های نهایی (قالب‌های پرداخت) شکل می‌گیرند. سپس محصولات قالبگیری شده برای ایجاد محصولات نهایی پرس می‌گردند. آینه‌های بسیار بزرگ و دقیق مورد استفاده در تلسکوپ‌ها نیز به طور مستقیم در داخل یک قالب، ریخته‌گری می‌شود و شکل نهایی آنها بوسیله نیروی گرانش ایجاد می‌گردد. در نهایت بر روی محصول عملیات آنیلینگ و سایر عملیات حرارتی انجام گردیده تا یک شیشه کریستالی با ضریب انبساط نزدیک به صفر تولید گردد.



شکل (۸-۷): فرآیند شکل‌دهی حباب‌ها



شکل (۸-۸): فرآیند شکل دهی لامپ تصویر تلویزیون

× لوله‌ها و میله‌ها

لوله‌ها و میله‌های شیشه‌ای را می‌توان با استفاده از فرآیندهای کششی^۱ و یا روش‌هایی که به نام‌های دانه^۲ و ولو^۳ نام گذاری شده اند، تولید نمود (شکل ۸-۹).

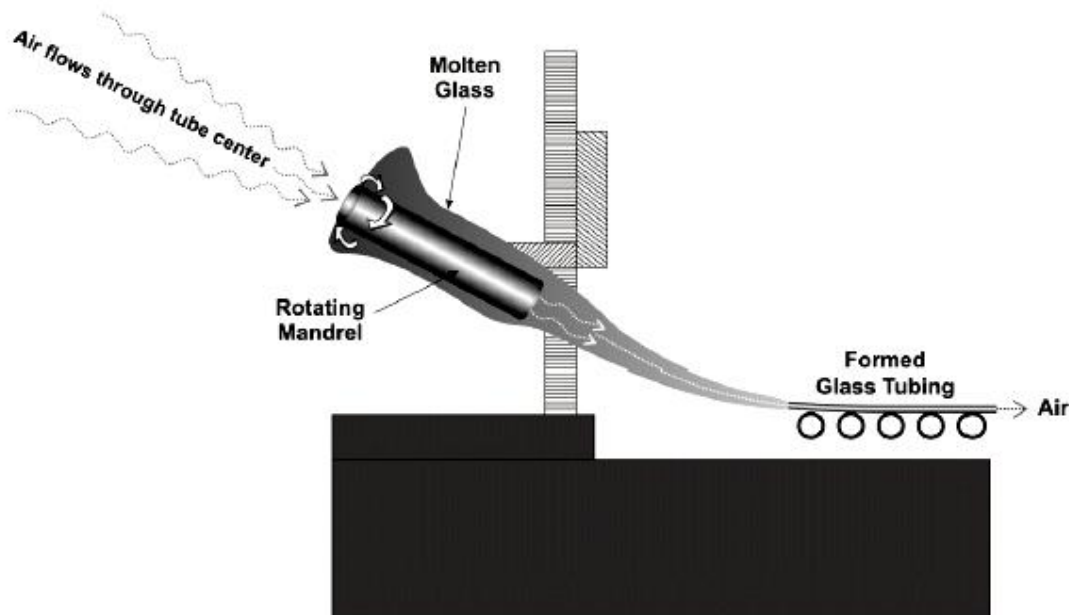
در طی فرآیند دانه، مقدار مشخصی از مذاب شیشه بر روی سطح یک سنبه دوار افقی ریخته می‌شود. سنبه^۴ به شکل مرغک ماشین تراش بوده و از مرکز آن هوا به شکل پیوسته‌ای دمیده می‌شود. بدین ترتیب مذاب شیشه به شکل لوله از سنبه کشیده می‌شود. جریان هوای دمشی باعث می‌شود تا لوله ساخته شده از مذاب خمیری شکل شیشه، تا هنگام سرد و سخت شدن شکل خود را حفظ نماید. با کنترل سرعت و مقدار هوای دمشی از مرکز سنبه، ابعاد لوله‌های شیشه‌ای تولیدی کنترل می‌شود.

در طول فرآیند ولو، شیشه مذاب به طور عمودی (به سمت پایین) به داخل فضای خالی بین یک سنبه عمودی و یک جدار استوانه‌ای شکل از جنس نسوز ریخته شده و از این فضا عبور می‌کند. سنبه در داخل فورهارت و در ته مخزن ذوب قرار گرفته است. فرآیند کشش در این حالت مشابه فرآیند کشش در روش تولید دانه می‌باشد.

از فرآیند کششی برای ساخت لوله یا میله‌هایی با قطر زیاد استفاده می‌شود. در این فرآیند، هوا از داخل یک مخروط به سمت بالا دمیده می‌شود تا ابعاد (قطر) لوله شیشه‌ای کنترل شود.

1- Updraw Process
2- Danner
3- Vello
4- Mandrel

در تمام فرآیندهای ذکر شده می‌توان با کاهش و یا حذف فشار هوای دمنده، میله‌های شیشه‌ای (توپر) نیز تولید نمود. که تشریح گردید، نیز می‌تواند با کاهش میزان هوای دمنده ساخته شود.



شکل (۸-۹): فرآیند شکل‌دهی لوله‌ها و میله‌های شیشه‌ای

× شیشه‌های دست‌ساز

محصولات شیشه‌ای دست‌ساز، معمولاً کوچک بوده و دارای تنوع بسیار زیادی در صنعت شیشه‌سازی می‌باشند. این محصولات، شامل ظروف کریستالی، لوازم علمی و آزمایشگاهی و محصولات تزئینی و هنری می‌باشند.

ساخت ظروف شیشه‌ای با دمیدن به داخل شیشه مذاب (که در سال ۵۰ قبل از میلاد مسیح توسط رومی‌ها ابداع گردید)، امروزه نیز پایه تولید محصولات شیشه‌ای دست‌ساز است. در این روش مذاب شیشه با دمیدن هوا به داخل آن از طریق لوله دم، مانند یک حباب در انتهای لوله دم باد کرده و شکل می‌گیرد. شکل‌دهی دستی به مذاب شیشه با مرحله مذاب‌گیری یا جمع‌آوری مذاب که شامل گرفتن شیشه مذاب از داخل مخزن مذاب با استفاده از نایچه^۱ می‌باشد، آغاز می‌گردد. به محض آنکه لوله نایچه با سطح داغ مذاب تماس پیدا می‌کند، به آن چرخش داده می‌شود و شیشه مذاب به لوله می‌چسبد. تنها یک بار وارد کردن نایچه به داخل مخزن مذاب، باعث مذاب‌گیری لازم برای ساخت محصولاتی در ابعاد گلدان و یا لیوان می‌شود. برای تولید اشیاء بزرگ‌تر نیز به طور مشابهی عمل می‌شود، اما این محصولات نیازمند تعداد دفعات بیشتری از مذاب‌گیری می‌باشند.

1- Blow Iron

بعد از اینکه مرحله مذاب‌گیری کامل گردید، برای نگه داشتن شیشه مذاب در مرکز نایچه، به آرامی آنرا به چرخش در می‌آورند. در این زمان هوا از دم فرد شیشه‌گر به داخل لوله نایچه دمیده شده و شیشه شکل اولیه حباب را به خود می‌گیرد. سپس با غلتاندن حباب شیشه بر روی یک صفحه مسطح و دمش‌های متناوب به آن شکل نهایی را می‌دهند. اثر سرمایش ناشی از غلتاندن حباب شیشه بر روی سطح فلزی یا سنگی میز کار باعث می‌شود تا شیشه نیز کم‌کم سخت گردیده و به این ترتیب حباب شیشه با کنترل بیشتر و راحت‌تری تحت شکل‌گیری قرار گیرد. ادامه فرآیند شکل‌دهی شیشه با تاب دادن متناوب نایچه و یا با کشیدن و شکل دادن شیشه، بوسیله ابزار مختلف انجام می‌پذیرد. همچنین مذاب شیشه می‌تواند توسط یک وسیله پارو مانند، پهن گردیده و یا در داخل قالب به نحو دیگری شکل پذیرد. معمولاً گرمایش متناوب برای پرداخت در پایان عملیات شکل دهی لازم است.

× الیاف شیشه‌ای

الیاف شیشه‌ای به منظور تولید عایق‌های پشم شیشه، استفاده در صنایع نساجی و کابل‌های فیبر نوری تولید می‌شوند. امروزه از فرآیندهای مختلفی برای تولید پشم شیشه، الیاف نساجی و یا فیبرهای نوری استفاده می‌شود. الیاف شیشه‌ای از هر نوع که باشند، یا به طور مستقیم با استفاده از مذاب شیشه خروجی از فورهارت و یا به طور غیر مستقیم بوسیله فرم دادن مذاب شیشه به صورت سوزنی^۱ و سپس ذوب مجدد آن در مراحل بعدی، تولید می‌گردند. فرآیندهای مستقیم تولید الیاف شیشه‌ای میزان سوخت کمتری را نیاز دارند، ولی در عین حال سازگاری کمتری هم نسبت به روش غیر مستقیم دارند.

دو روش بسیار معمول که برای شکل‌دهی الیاف پشم شیشه مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- ریسندگی چرخشی^۲
- شعله‌های نازک‌کننده^۳

فرآیند ریسندگی چرخشی سهم بیشتری در تولید الیاف پشم شیشه دارد. هر دو فرآیند تولید الیاف پشم شیشه به روش ریسندگی چرخشی و شعله‌های نازک‌کننده می‌توانند به روش مستقیم و روش غیر مستقیم عمل نمایند. در روش مستقیم (که مذاب شیشه از فورهارت کوره در درجه حرارت بالا گرفته می‌شود) و همچنین با روش غیر مستقیم (شکل‌دهی مذاب شیشه به صورت سوزنی و سپس ذوب مجدد آن) عمل نمایند. در روش ریسندگی چرخشی، جریانی از مذاب شیشه که از فورهارت کوره با درجه حرارت بالا خارج می‌شود، با عبور از یک ریسنده^۴ دوار بسیار پر سرعت با دور ۳۰۰۰ - ۲۰۰۰ rpm به الیاف شیشه‌ای تبدیل می‌شود. ریسنده دوار از جنس آلیاژهای مناسب برای کار در دماهای بالا می‌باشد که انجام فرآیند شکل‌دهی در درجه حرارت بالا امکان پذیر باشد (۸-۱۰). مذاب شیشه در اثر نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش ریسنده با فشار از داخل هزاران سوراخ بسیار ریزی که بر روی ریسنده قرار دارند، عبور می‌کند. چرخش مکانیکی ریسنده نیرویی ایجاد

1- Small Rods
2- Rotary Spin
3- Flame Attenuation
4- Spinner

می‌کند که باعث تراویدن (تراوش) مذاب شیشه به صورت الیاف از سوراخ‌های بسیار ریز واقع در بر سطح محیطی ریسنده و شکسته شدن الیاف شیشه‌ای بدست آورده می‌شود. همزمان جریانی از هوای بسیار گرم (یا گاز داغ) از بالا به سمت پایین، الیاف شیشه‌ای تولیدی را از ریسنده جدا کرده و آنها را بر روی یک تسمه نقاله بر روی هم انباشته می‌کند. بیش از ۱۲ ریسنده می‌توانند از فور هارت یک کوره تغذیه شوند.

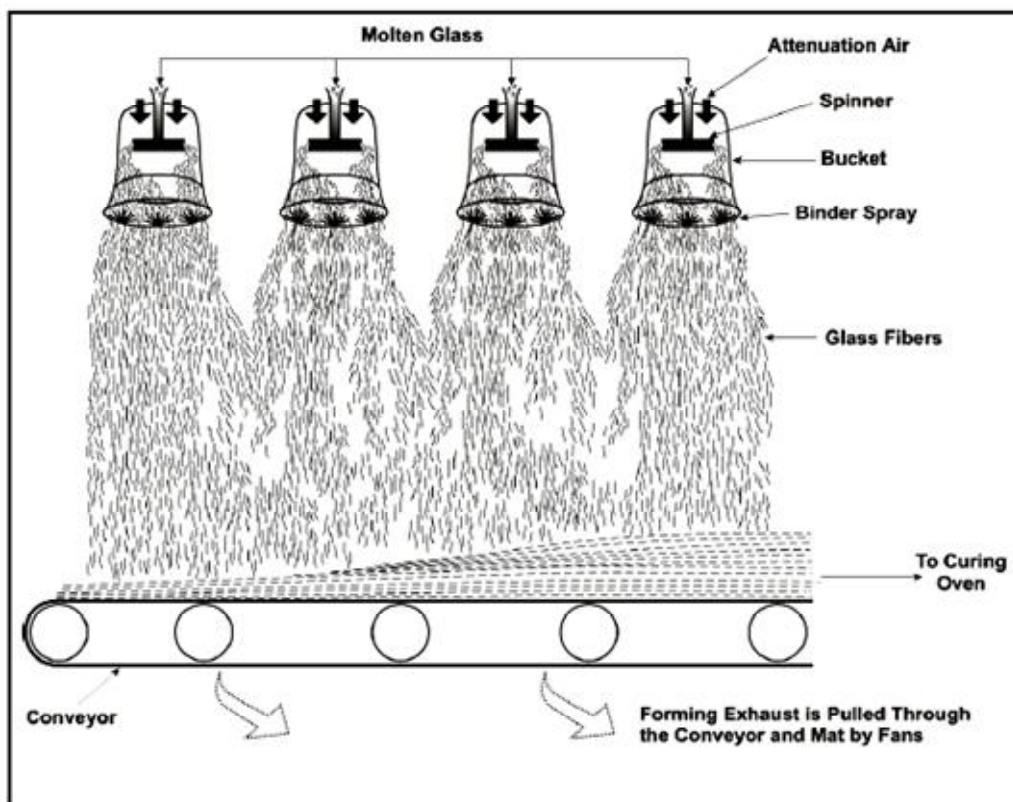
در روش شعله‌های نازک کننده، از شعله‌های ظریف و یا هوای داغ برای باریک کردن الیاف شیشه‌ای استفاده می‌شود. مذاب شیشه تحت تاثیر نیروی گرانش از کوره خارج شده و در امتداد تعداد بسیار زیادی منفذ برای ایجاد رشته‌های شیشه‌ای جریان می‌یابد. سپس رشته‌های شیشه‌ای تولید شده در معرض شعله و یا هوای داغ و پر سرعت تا حد بریده شدن، کش آمده و نازک می‌شوند (شکل ۸-۱۱). در نتیجه این فرآیند شکل‌دهی، مقدار قابل ملاحظه‌ای از مذاب شیشه تا حد ۳۰ درصد وزنی به صورت غیر قابل استفاده در اطراف منافذ انباشته شده و به یکدیگر می‌چسبند.

پشم شیشه نیز می‌تواند بوسیله دمیدن هوا یا بخار به داخل مذاب شیشه تولید گردد. در این فرآیند، جریان‌هایی از شیشه مذاب در امتداد آستری^۱ از آلیاژ پلاتین جریان می‌یابد و در معرض جت‌هایی از جریان بخار یا هوا قرار می‌گیرد که باعث نازک کردن رشته‌های شیشه‌ای و تبدیل آنها به الیاف پشم شیشه می‌شود. طول الیاف شیشه‌ای و ضخامت آنها می‌تواند بوسیله تنظیم فشار جت هوا یا بخار و یا با تنظیم درجه حرارت مذاب شیشه تنظیم گردد (شکل ۸-۱۲).

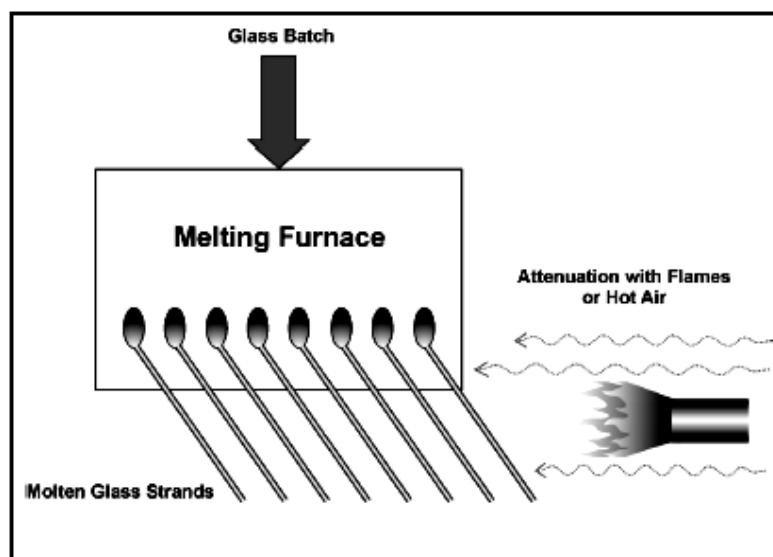
صرف نظر از تنوع روش‌های شکل‌دهی، الیاف پشم شیشه در معرض اسپری یک محلول چسبناک شیمیایی قرار می‌گیرند که ترکیب مواد تشکیل دهنده آن متغیر است اما عموماً شامل محلولی از رزین فنل، فورمالدئید، آب، اوره، الیاف چوبی با بافت‌های گیاهی، سیلان و آمونیاک می‌باشد. در برخی موارد، به محلول شیمیایی فوق مقداری مواد رنگی نیز اضافه می‌گردد.

الیاف پشم شیشه با ضخامت‌های متنوعی در محدوده بین ۱۰-۰/۳ میکرون تولید می‌گردند. با این حال می‌توان گفت که اکثر الیاف پشم شیشه تولید شده ضخامتی در محدوده ۱۰-۳ میکرون می‌باشند. همچنین طول الیاف پشم شیشه تولیدی معمولاً در حدود کمی بیش از یک اینچ است.

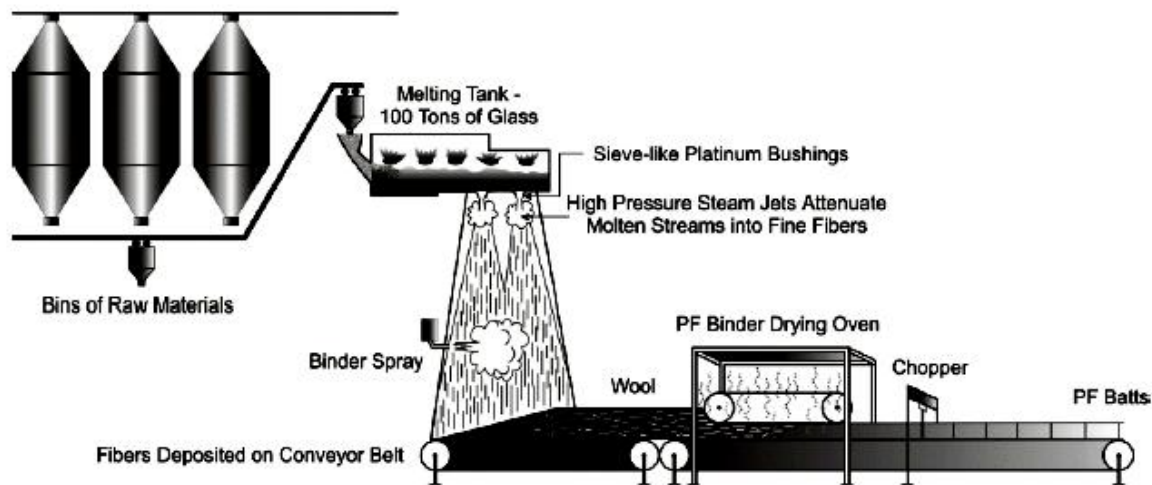
الیاف نساجی (رشته نخ‌های پیوسته) بوسیله تحت فشار قرار دادن مذاب شیشه با محتوای قلیایی کم (شیشه E) و عبور آن از درون تعداد زیادی از منافذ کوچک شکل می‌گیرد. این منافذ بر روی آستری (بوشینگ) از جنس آلیاژ پلاتین قرار دارند که درجه حرارت‌های بالا را تحمل می‌کند و از تعداد بسیار زیادی سوراخ‌های کوچک تشکیل شده است. الیاف پیوسته‌ای که به این صورت از سوراخ‌ها بیرون فرستاده می‌شوند، بر روی یک غلتک کشیده شده و برای پوشش دهی با مواد مختلف و در نهایت پیچیدن بر روی دوک‌ها به قسمت‌های بعدی فرآیند فرستاده می‌شوند.



شکل (۸-۱۰): فرآیند ریسندگی چرخشی



شکل (۸-۱۱): فرآیند تولید الیاف شیشه‌ای با استفاده از شعله‌های نازک کننده



شکل (۸-۱۲): فرآیند تولید پشم شیشه با استفاده از جت‌هایی از جریان بخار یا هوا

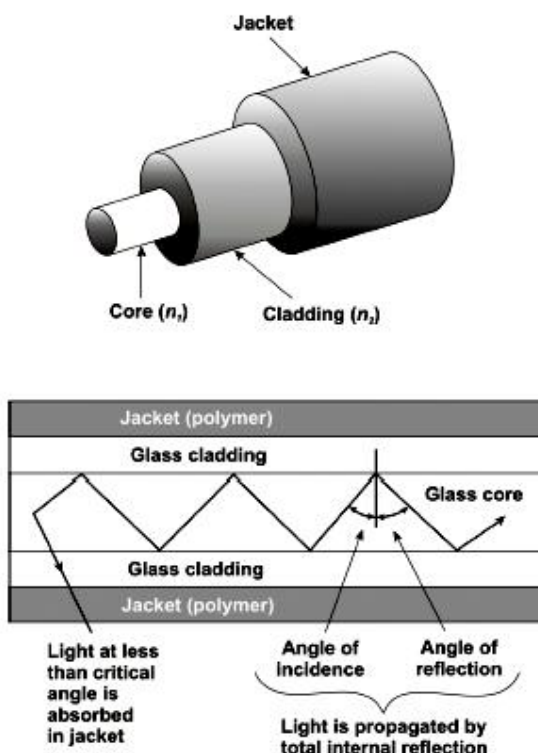
× فیبرهای نوری

این نوع فیبرها برای ساخت کابل‌های فیبر نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. و به همین دلیل باید درجه خلوص آنها به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گیرد. فیبرهای نوری باید عاری از هر گونه حباب، ناهمواری، خراش، بریدگی، چین و شکن و سایر عیوب و ناخالصی‌هایی باشد که باعث اختلال در مسیر گذر نور و بازتاب آن در داخل فیبر نوری می‌شود. شیشه مورد استفاده در تولید فیبرهای نوری معمولاً از جنس دی اکسید سیلیکون بسیار خالص و بسیار شفاف می‌باشند. در ضمن موادی نیز به عنوان افزودنی جهت حصول به ضریب انکسار مطلوب به این فیبرهای نوری اضافه می‌شود. عناصری مانند ژرمانیوم و یا مواد فسفری ضریب مذکور را افزایش داده و موادی نظیر فلورین ضریب انکسار نور را کاهش می‌دهند.

در سال ۱۹۷۰، اولین فیبر نوری با افتی کمتر از ۲۰ دسی بل در هر کیلومتر ساخته شد و باعث شد که فیبر نوری به عنوان یک سیستم کاربردی در انتقال اطلاعات معرفی گردد. امروزه افت بهترین کابل‌های نوری کمتر از ۰/۲ دسی بل در هر کیلومتر است.

فیبرهای نوری حاوی از دو لایه هم مرکز تشکیل می‌شوند. نور در امتداد هسته مرکزی فیبر نوری جریان می‌یابد. جنس روکش خارجی متفاوت از هسته مرکزی بوده و با ایجاد اختلاف در ضریب شکست نور، باعث بازتابش کلی نور در داخل هسته مرکزی می‌گردد. بدین ترتیب نور با بازتابش‌های متناوب در داخل هسته مرکزی مسیر خود را در فیبر نوری ادامه می‌دهد. اختلاف ضریب شکست نور بین هسته مرکزی و روکش فیبر

نوری باید در هنگام تولید به شکلی بسیار دقیق تحت کنترل قرار گیرد تا اختلاف بیش از ۱٪ نشود. به عنوان مثال در صورتی که ضریب شکست نور در هسته مرکزی ۱/۴۷ باشد، مقدار آن در روکش باید ۱/۴۶ باشد. اکثر فیبرهای نوری دارای یک روکش پلیمری نیز بر روی روکش خود هستند تا از هسته مرکزی و روکش در برابر شوک‌های احتمالی محافظت نمایند (شکل ۸-۱۳). روکش پلیمری تنها شوک‌های وارده را جذب کرده و فاقد ویژگی‌های نوری می‌باشد. فیبرهای نوری با قطرهای بسیار کوچکی ساخته می‌شوند که به معنای آنست که فرآیند شکل دهی آنها باید ر فوق العاده دقیق باشد تا تلورانس‌های مورد نظر حاصل گردد (جدول ۸-۱).



شکل (۸-۱۳): ساختار فیبرهای نوری

جدول (۸-۱): قطر فیبرهای نوری مورد استفاده (μm)

هسته مرکزی	روکش
8	125
50	125
62.5	125
100	140

۸-۲- انرژی مورد نیاز در فرآیند شکل دهی

عملیات شکل دهی مذاب شیشه بسیار متنوع هستند و بر حسب نوع محصول نهایی از ۱۲٪ (به عنوان مثال در تولید شیشه جام) تا ۳۴٪ (برای شکل دهی الیاف شیشه‌ای) از کل انرژی مصرفی شامل تلفات الکتریکی را به خود اختصاص می‌دهد. مقادیر مصرف ویژه انرژی در فرآیندهای شکل دهی در جدول (۸-۲) نشان داده شده است.

در اکثر موارد، فرآیندهای شکل دهی نیاز زیادی به انرژی حرارتی ندارند و سهم بالایی از انرژی مورد نیاز از نوع الکتریکی برای عملیات ماشین کاری، حرکت فن‌ها، دمنده‌ها، کمپرسورها، تسمه نقاله‌ها و سایر تجهیزات الکتریکی است. در تولید شیشه جام، از انرژی الکتریکی برای گرم کردن قلع استفاده می‌شود.

در تولید محصولات شیشه‌ای مظروف، میزان انرژی مصرفی بستگی به وزن ظروف تولیدی و همچنین بازدهی عملیات شکل دهی دارد. معمولاً ظروف شیشه‌ای سبک‌تر به مقدار انرژی کمتری برای تولید نیاز دارند.

بازدهی تولید نیز که به صورت نسبت محصول نهایی بسته‌بندی شده به مذاب تولیدی تعریف می‌شود و در واقع نسبت مقدار محصولات نهایی قابل عرضه به بازار به حجم تولید ناخالص شیشه است، بر میزان انرژی مصرفی تاثیر می‌گذارد. هر چه نسبت بازدهی تولید بیشتر باشد، انرژی کمتری برای تولید محصول مورد نیاز است. نسبت بازدهی تولیدی برای شکل دهی محصولات شیشه‌ای مظروف در حدود ۹۶ - ۸۶ درصد است. سهم بالایی از انرژی مورد استفاده در فرآیند شکل دهی محصولات شیشه‌ای مظروف، انرژی الکتریکی است که معمولاً برای تولید هوای فشرده استفاده می‌شود.

فرآیند شکل دهی شیشه به روش پرسی - دمشی، بطور متوسط در حدود ۲۷ درصد از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد.

در فرآیندهای شکل دهی الیاف شیشه‌ای، سوخت مضاعفی برای انجام فرآیند بازگرمایش الیاف مورد نیاز است. مقدار سوخت مورد نیاز جهت انجام عملیات شکل دهی الیاف شیشه‌ای به دلیل تنوع این عملیات، متفاوت است. بطور کلی روش شکل دهی توسط شعله‌های نازک‌کننده به کمترین مقدار انرژی نیاز داشته و ماشین‌های کشش، بیشترین انرژی را مصرف می‌کنند.

جدول (۸-۲): انرژی مورد نیاز در فرآیند شکل دهی شیشه

انرژی الکتریکی ^۱ (10 ⁶ Btu/ton)	انرژی الکتریکی (KWh/ton)	حامل انرژی
1.5	440	شیشه جام
0.4	105	شیشه مظروف
5.3	1553	پرسی - دمشی
7.2	2110	الیاف شیشه‌ای

۱ - بر مبنای ضریب تبدیل ۳۴۱۲ Btu/KWh برای انرژی الکتریکی