

فصل هفتم

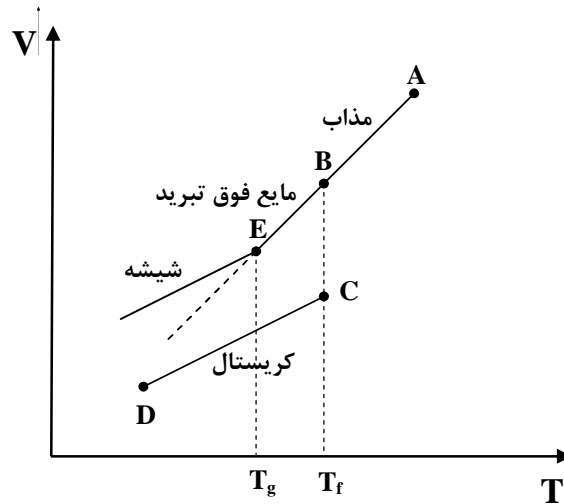
گرانروی شیشه

۷-۱- گرانروی یا ویسکوزیته

شیشه را می‌توان ماده‌ای دانست که از طریق سرد کردن مایع مذاب آن بدست می‌آید، بطوری که در طول فرآیند سرد کردن هیچگونه تغییر ناگهانی در آن به وقوع نپیوسته و با کاهش دما، گرانروی مایع مذاب بطور پیوسته، افزایش یابد تا بصورت جامد درآید. به عبارت دیگر شیشه، ماده‌ای است غیرآلی که از سرد کردن مذاب بدست می‌آید به شرطی که در طول سرد کردن، عمل انجماد یا کریستالیزاسیون صورت نگیرد. برای درک بهتر این مطلب، منحنی تغییرات حجم شیشه نسبت به دما در شکل (۷-۱) نشان داده شده است.

همانطور که از شکل (۷-۱) نیز پیداست، با سرد کردن مذاب شیشه از دمای نقطه A ، حجم بتدریج کاهش می‌یابد تا به نقطه B برسد، که درجه حرارت متناظر آن، دمای نقطه انجماد (T_f) نامیده می‌شود. چنانچه سرعت سرد کردن آهسته باشد، کریستالیزاسیون یا انجماد اتفاق می‌افتد. این عمل در درجه حرارت ثابت انجام شده و با کاهش شدید حجم (مسیر BC) همراه است. در نقطه C ، فاز مایع مذاب از بین رفته و مذاب به جامد کریستالی تبدیل شده است. با ادامه کاهش دما، کاهش حجم یا انقباض ادامه می‌یابد (مسیر CD) که به دلیل ماهیت و ساختمان ماده، شیب کاهش حجم در مسیر CD با شیب کاهش حجم در مسیر AB متفاوت است.

اگر سرعت سرد کردن به اندازه کافی سریع باشد، در نقطه B عمل انجماد آغاز شده و مذاب با همان شیب AB به کاهش حجم ادامه می دهد. بعد از نقطه B مایعی وجود دارد که هر چند از نقطه انجماد گذشته است ولی منجمد نشده که به آن مایع فوق تبرید¹ می گویند.



شکل (۷-۱): منحنی تغییرات حجم و دما در تولید شیشه و کریستال

با ادامه کاهش حرارت در نقطه E، شیب منحنی کاهش حجم تغییر کرده و با شیبی تقریباً موازی با شیب کاهش حجم در مسیر CD ادامه می دهد تا به دمای محیط برسد. درجه حرارت متناظر با نقطه E را درجه حرارت انتقال شیشه (T_g) (Transformation Temperature / Glass Transition Temperature) می نامند. در حقیقت در پائین تر از نقطه T_g شیشه وجود دارد. مقدار دمای T_g بسته به سرعت سرد کردن تغییر می کند و در نتیجه برای بیان نقطه T_g باید از محدوده T_g نام برد. هر ماده ای که نقطه T_g آن در گرانروی های معادل 10^{13} پویز اتفاق بیفتد، شیشه نامیده می شود. البته از نظر تئوری، مذاب هر ماده ای را می توان با سرعت مناسبی از سرد کردن به گونه ای کنترل کرد که مسیر ABE یا مسیر شیشه را طی کند، ولی در عمل این امر پذیر نبوده و معمولاً مایعاتی که در نقطه ذوبشان گرانروی کمی دارند با سردکردنهای عادی مسیر کریستال را طی می کنند و مایعاتی که در نقطه ذوبشان گرانروی بالائی دارند، با سرعتهای سرد کردن عادی مسیر شیشه را طی می کنند. در جدول (۷-۱)، نقطه ذوب و گرانروی برای گروهی از مواد ارایه شده است.

البته زیاد بودن مقدار گرانروی، تنها شرط کافی برای شیشه ساز بودن نیست. مثلاً گرانروی سیستم TeO_2-PbO در نقطه ذوب معادل یک پویز است، ولی با این وجود تشکیل شیشه می دهد.

اصولاً برای تشکیل کریستال و ایجاد نظم ساختمانی، لازم است که بندهایی شکسته شده و مجدداً با زاویه و جهت مناسب تشکیل گردد. هر چه گرانروی کمتر و تحرک و جابجائی اتمها بیشتر باشد، امکان یافتن آرایش منظم در نقطه انجماد بیشتر است. در حالی که بالا بودن گرانروی از تحرک و آزادی عمل اتمها کاسته و بدلیل

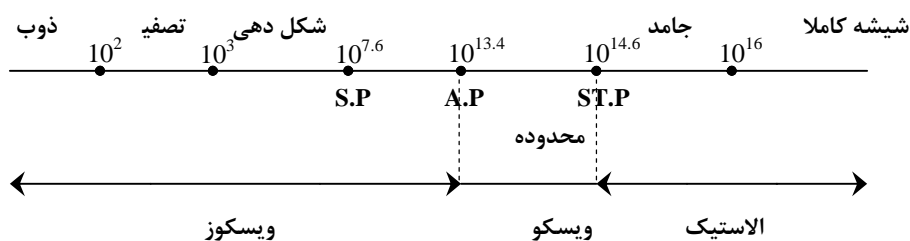
پیوندهای محکمی که بین اتمها وجود دارد، امکان ایجاد آرایش کریستالی وجود نداشته و با سرد کردنهای آهسته نیز، مواد شیشه ساز مسیر شیشه‌ای شدن را طی می‌کنند.

جدول (۷-۱): نقطه ذوب و گرانیوی مواد

ماده	Zn	Fe	A ₂ O ₃	B ₂ O ₃	GeO ₂	SiO ₂	BeF ₂
نقطه ذوب (°C)	۴۲۰	۱۵۳۵	۳۰۹	۴۵۰	۱۱۱۵	۱۷۱۰	۴۵۰
گرانیوی (پویز)	۰/۰۳	۰/۰۷	۱۰ ^{۰۶}	۱۰ ^{۰۵}	۱۰ ^{۰۷}	۱۰ ^{۰۷}	۱۰ ^{۰۶}

۷-۲- نقاط مرجع (دما)

مذاب شیشه در درجه حرارت زیاد یک سیال روان است و با کاهش دما، بتدریج رفتاری الاستیک از خود نشان می‌دهد. بنابر این میزان سفتی یک مذاب، تابع گرانیوی و گرانیوی نیز تابع دماست. این تغییرات را می‌توان بصورت شکل (۷-۲) نشان داد.



شکل (۷-۲): تغییرات گرانیوی شیشه در مراحل مختلف فرآیند

مذاب شیشه در محدوده ویسکوز مانند یک سیال غلیظ عمل می‌کند، بطوریکه گرانیوی آن تابع دما می‌باشد. در ناحیه ویسکوالاستیک، سطح مذاب رفتار الاستیک و عمق مذاب رفتار ویسکوز از خود نشان می‌دهد. الاستیسیته، یک تغییر شکل کاملاً برگشت پذیر است و از قرار دادن جسمی تحت یک تنش لحظه‌ای معین به وجود می‌آید و با برداشتن آن تنش، جسم بلافاصله به حالت اول باز می‌گردد.

ویسکوزیته، تغییر شکلی کاملاً بازگشت ناپذیر است. از تنش به وجود می‌آید و تغییر شکل با جریان یافتن سیال شروع می‌شود و تا زمانی که تنش باقی است و یا تا زمانی که از آن تنش مشخص یک جریان تعادلی به وجود نیامده، تغییر شکل ادامه دارد.

در طی سالها، چندین نقطه مرجع برای بیان گرانروی شیشه‌ها تعیین گردیده است. این دماهای مرجع که در توضیح رفتار شیشه، نوع شیشه و تفکیک شیشه‌های مختلف مؤثرند، عبارتند از:

- ۱- نقطه ذوب،
- ۲- دامنه کارپذیری،
- ۳- نقطه نرم شدن،
- ۴- نقطه تنش زدایی،
- ۵- نقطه کرنش.

۱-۲-۷- نقطه ذوب

فرآیند ذوب زمانی آغاز می‌گردد که بار مواد اولیه (بیچ) وارد کوره می‌شود و تکمیل آن زمانی است که در مذاب شیشه تولیدی هیچگونه مواد بلوری موجود در بار اولیه مشاهده نشود. در نتیجه مفهوم زمان ذوب عبارت خواهد بود از زمان مورد نیاز برای اینکه کلیه قسمت‌های بار ذوب شود و چیزی از آن باقی نماند.

دمای ذوب، دامنه ای از دمای کوره است که شیشه با یک بازده اقتصادی مطلوب ذوب می‌شود. در چنین دمایی، گرانروی شیشه در محدوده $10^{2/5}$ - $10^{1/5}$ پویز است. در بهترین حالت، گرانروی شیشه در دمای ذوب، 10^0 پویز بیان شده است.

۲-۲-۷- دامنه کارپذیری

دامنه کارپذیری، محدوده‌ای از دمای سطح مذاب است که در این محدوده دمایی، مذاب طی یک روش خاص به صورت شئی شکل داده می‌شود. **حد بالا**، دمایی است که در آن مذاب آماده کارپذیری است. این حد معمولاً متنظر با گرانروی 10^3 پویز (**نقطه کارپذیری**) یا $\text{Log}\eta = 3$ است، در حالی که **حد پایین** دمایی است که در آن شیشه به اندازه کافی که بتواند شکل خود را نگه دارد، چسبنده شده است. این حد معمولاً متنظر با گرانروی معادل 10^7 پویز (**نقطه قوام پذیری**) یا $\text{Log}\eta = 7$ است.

نقطه کارپذیری، جایی است که عملیات تصفیه و همگن‌سازی مذاب پایان یافته و مذاب شیشه‌کاری از حباب شده است.

مذاب هنگام ورود به ماشین شکل‌دهی و هنگام ترک آن باید شرایط دمایی خاصی را دارا باشد. در واقع آنچه که قطعه شیشه‌ای باید در مسیر حرکت ماشین برای حفظ شکل خود داشته باشد، نوع خاصی از صلابت و استواری است. وقتی مذاب وارد ماشین شکل‌دهی می‌شود، برای آنکه تحت اثر نیروهایی که از جانب ماشین به آن وارد می‌شود، قابل شکل‌دهی (شکل‌پذیری) باشد، باید سیالیت کافی داشته باشد. تجربه صنعت شیشه نشان داده است که این سیالیت در حدود گرانروی 10^3 پویز می‌باشد. همچنین در گرانروی حدود 10^7 پویز، شیشه صلابت لازم برای تحمل شرایط تخلیه از قالب را داراست.

۳-۲-۷- نقطه نرم شدن

در نقطه نرم شدن مقدار دقیق گرانروی را نمی‌توان تعیین کرد. زیرا گرانروی در این مرحله به چگالی و کشش سطحی شیشه بستگی دارد. دامنه گرانروی از 3×10^7 تا $1/5 \times 10^8$ پویز متغیر است. مقدار گرانروی در نقطه نرم شونده‌گی برای شیشه‌های سودا - آهکی حدود $10^{7/6}$ پویز است. معمولاً شیشه‌ها را از لحاظ کیفی بر اساس چگونگی نمودار گرانروی - دما متمایز می‌کند. شیشه‌ای که نقطه نرم شونده‌گی آن بالاست، به عنوان شیشه سخت و شیشه‌ای که دارای نقطه نرم شونده‌گی پایین است، به عنوان شیشه نرم شناخته می‌شود. اگر شیب نمودار گرانروی- دما تیز باشد، شیشه زود قوام و در حالت عکس شیشه دیر قوام نامیده می‌شود.

۴-۲-۷- نقطه تنش‌زدایی

تنش‌زدایی در محدوده‌ای اتفاق می‌افتد که رفتار شیشه ویسکوالاستیک است. حد بالایی محدوده تنش‌زدایی را که گرانروی شیشه در آن معادل 10^{13} پویز می‌باشد و تنش‌ها در مدت چند دقیقه آزاد می‌شوند، نقطه تنش‌زدایی نام دارد. تنش‌هایی که در این محدوده ایجاد می‌شوند، تنش‌های دائمی هستند که برای مقاومت شیشه مضر می‌باشند و باید کاری کرد که در این مرحله تنش‌های باقی مانده به حداقل برسند.

۵-۲-۷- نقطه کرنش

نقطه کرنش، حد پایینی محدوده تنش‌زدایی است و دمایی است که در آن گرانروی شیشه حدود $10^{14/6}$ پویز می‌باشد و تنشها در مدت چند ساعت آزاد می‌شوند. اختلاف دمایی حد بالا و حد پایین تنش‌زدایی، تقریباً $40-50^\circ\text{C}$ است، در صورتی که اختلاف گرانروی بین این دو نقطه بسیار زیاد است. عبارت تنش معمولاً به نیرو بر واحد سطح و کرنش، به تغییر شکل نسبی دلالت دارند. از آن جا که معمولاً تنش همراه با کرنش است، هر دو عبارت را بجای هم به کار می‌برند. اما باید توجه داشت که این دو دارای یک مفهوم نیستند. از ویسکوزیته بالاتر از $10^{14/6}$ رفتار شیشه کاملاً الاستیک است و تنش‌های ایجاد شده در این ناحیه، تنش‌های موقت نامیده می‌شوند.

۳-۷- محاسبه دما برای گرانروی‌های مرجع

پس از بررسی و مطالعه بر روی بیش از یک صد ترکیب مختلف شیشه و مدل‌سازی ریاضی، نتایج بدست آمده برای تخمین گرانروی و دمای نقاط مرجع منجر به ارائه معادله (۷-۱) گردید. فرمول پیشنهادی (۷-۱)، به صورت تئوری رابطه دمای هر نقطه مرجع با درصد اکسیدهای ترکیبات شیشه را نشان می‌دهد.

$$T = ax + by + cz + d + e(u - f) \quad (7-1)$$

که در این فرمول، متغیرها عبارتند از:

X: درصد وزنی Na_2O در شیشه

Y: درصد وزنی $\text{MgO} + \text{CaO}$ در شیشه

Z: درصد وزنی Al_2O_3 در شیشه

U: درصد وزنی MgO در شیشه

T: دما بر حسب فارنهایت

a, b, c, d و e ضرایبی هستند که با توجه به ترکیب تشکیل دهنده شیشه و از حل دستگاه معادلات جبری حاصل از پیاده‌سازی معادله (۷-۱) در چند نقطه مرجع که دمای آن اندازه‌گیری شده و ترکیب مواد اولیه تشکیل دهنده شیشه نیز مشخص است، بدست می‌آیند.

ضریب f ثابت و برای شیشه‌های سودا - آهکی معادل ۰/۵ فرض شده است.

برای بدست آوردن T (دمای هر نقطه مرجع) یک دسته ضرایب a تا e در جدول شماره (۷-۲) ارائه شده است. بدین ترتیب با داشتن ضرایب مربوط به هر نقطه و آنالیز شیشه می‌توان دمای نقطه مرجع را بدست آورد. در استفاده از این ضرایب محدودیتهای زیر را باید در نظر گرفت.

الف- شیشه باید از نوع شیشه‌های مطروف سودا - آهکی و بی‌رنگ باشد.

ب- حداقل اکسید آلومینیم باید ۱/۵ درصد وزنی در شیشه باشد.

بکار بردن این معادله برای شیشه‌های رنگی سودا - آهکی که در این محدوده صدق کنند، نتایج نسبتاً مناسبی به همراه خواهد داشت.

جدول شماره (۷-۲): نمایش ضرایب a تا e

e	d	c	b	a	Logh
20.5175	3422.54	49.0509	-37.8197	-31.8028	2
13.7158	2790.39	14.9595	-23.2872	-27.7307	3
-5.38546	2007.48	-119.525	0.731176	-29.1932	7
2.43499	1431.97	43.8841	-1.04555	-10.7745	7.6
-3.41295	1060.71	20.4917	3.91852	-8.000	13

۷-۴ - رابطه گرانروی با دما

یکی از روابط ساده‌ای که بین دما و گرانروی ارائه گردیده، بصورت معادله (۷-۲) است.

$$\text{Log}\eta = A + \frac{B}{T} \quad (7-2)$$

معادله مذکور در دامنه محدودی از دما صادق بوده و بیانگر رابطه خطی $\text{Log}\eta$ بر حسب $\frac{1}{T}$ است. برای دست آوردن دما و یا گرانیوی هر نقطه دلخواه دیگر غیر از نقاط مرجع، می توان بین دو نقطه درون یابی خطی انجام داد. به طور مثال اگر دمای نقطه برش، $(\text{Log}h = 3/3)$ نیاز باشد، کافی است بین نقطه کارپذیری $(\text{Log}h = 3)$ و نقطه قوام پذیری $(\text{Log}h = 7)$ که دمای آنها از معادله $(7-1)$ تخمین زده می شود، درون یابی صورت بگیرد.

5-7- روش کار

در مرحله نخست، آنالیز شیمیایی شیشه برای تخمین گرانیوی و دمای نقاط مرجع مورد نیاز است. سپس با بکارگیری معادله پیشنهادی $(7-1)$ و استفاده از ضرائب جدول شماره $(7-2)$ ، دماهای نقاط مرجع برای هر گرانیوی محاسبه می شود. در اینجا لازم است برای اینکه روشن گردد که نتایج تا چه اندازه به واقعیت نزدیک است، مقایسه ای بین دما و گرانیوی تئوری و واقعی صورت گیرد.

در جدول $(7-3)$ ، آنالیز چندین نمونه شیشه به همراه دماهای نقاط مرجع که از طریق اندازه گیری عملی گرانیوی مذاب شیشه و نیز از روش تئوری محاسبه شده، آمده است.

در جدول $(7-3)$ ، در مقابل هر آنالیز، در ردیف a، دماهای تئوری بر حسب درجه سانتیگراد و در ردیف b، دماهایی که گرانیوی مذاب در آن دماها اندازه گیری شده است، درج گردیده است. همانطور که ملاحظه می گردد، نتایج با تقریب بسیار خوبی قابل قبول است.

جدول شماره (۳-۷): آنالیز نمونه‌های شیشه همراه با دماهای نقطه مرجع

نمونه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O		Logh = 2	Logh = 3	Logh = 7	Logh = 7.6	Logh = 13
1	71.58	1.78	0.37	12.07	13.35	0.37	A	1433.3	1179.6	768.2	733.8	559.7
							B	1433.8	1178.8	767.2	734.4	553.8
2	72.09	1.7	0.45	11.26	13.94	0.2	A	1437.0	1179.8	763.3	728.8	554.4
							B	1435.5	1178.8	761.6	728.3	549.4
3	71.9	1.84	0.46	11.96	13.33	0.2	A	1436.8	1181.3	764.2	735.5	560.2
							B	1437.7	1182.7	768.3	735.0	556.1
4	72.79	1.79	0.78	10.52	13.36	0.31	A	1462.1	1197.3	765.6	735.2	556.0
							B	1464.4	1197.7	769.4	734.4	550
5	72.73	1.71	0.24	11.33	13.4	0.31	A	1447.3	1188.5	772.0	732.1	556.6
							B	1446.1	1187.7	765.5	733.3	547.7
6	72.33	1.56	0.44	11.05	14.17	0.17	A	1433.6	1177.9	768.8	724.2	554.3
							B	1432.2	1176.1	758.8	725.5	547.2
7	70.94	1.8	1.5	11.92	13.13	0.38	A	1430.1	1179.1	767.4	736.6	560.9
							B	1430.0	1179.4	768.3	736.6	555.5
8	72.19	1.72	0.45	11.24	13.93	0.19	A	1438.1	1180.5	762.2	729.4	554.7
							B	1436.1	1179.4	761.6	728.3	550.0
9	72.56	1.6	0.44	10.68	13.98	0.19	A	1445.8	1186.0	769.1	726.5	551.8
							B	1443.3	1182.7	761.1	726.2	547.2
10	72.27	1.6	0.33	11.14	14.1	0.34	A	1435.1	1178.7	767.7	725.4	552.3
							B	1431.1	1175.5	758.3	725.0	547.2

۶-۷- کاربرد کنترل گرانروی در مراحل مختلف فرآیند ساخت شیشه

تعیین گرانروی مذاب و کنترل آن در کل فرآیند و بخصوص در مراحل ذوب، تصفیه، شکل‌دهی و تنش‌زدایی ضروری است.

۱-۶-۷- ذوب

مرحله ذوب با ورود بار به کوره آغاز شده و با ذوب کلیه مواد بلوری تکمیل می‌شود. در دامنه‌ای از دماهای نسبتاً زیاد، یکسری از اتصالات شبکه به تدریج شکسته شده و بر حرکت لایه‌ای جریان چسبنده مذاب به تدریج افزوده می‌شود. حتی در دماهای بسیار بالا هم، به دلیل گرانروی زیاد شیشه، برای عملیات ذوب چندین ساعت زمان لازم است.

وجود اکسیدهای قلیائی (کمک ذوب‌ها) عمل ذوب را بهبود می‌بخشد و گرانروی و در نتیجه زمان ذوب را کاهش می‌دهد.

معمولاً در شیشه‌های اکسیدی سیلیکاتی، تقسیم‌بندی برای اکسیدها بصورت زیر وجود دارد:

- اکسیدهای شیشه ساز (Glass formers)

- اکسیدهای پایدارکننده (Stabilizers)

- اکسیدهای کمک ذوب (Fluxes)

در این تقسیم‌بندی اکسید شیشه‌ساز سیلیس است. اکسیدهای کمک ذوب آنهایی هستند که در حرارت‌های پایین با سیلیس وارد واکنش شده و در حقیقت نقطه ذوب را کاهش می‌دهند. این اکسیدها شامل اکسیدهای قلیائی نظیر اکسید سدیم و اکسید پتاسیم می‌باشند.

در تمام شبکه‌های سیلیکاتی، یک عنصر مشترک شامل یک یون Si^{4+} و چهار یون O^{2-} می‌باشد که یک چهاروجهی SiO_4 را تشکیل می‌دهد که سیلیس در مرکز و اکسیژن‌ها در رئوس قرار دارند. در شبکه سیلیس کریستالی، فواصل بند و زوایای بین چهار وجهی‌ها در تمام شبکه و در سه بعد یکسان بوده و نظم کاملی در شبکه حاکم است، در حالی که در سیلیس شیشه‌ای، زوایای اتصال چهار وجهی‌ها متغیر بوده و نظم کریستالی وجود ندارد. با ورود اکسیدهای قلیائی، نظیر اکسید سدیم یا اکسید کلسیم به شبکه، تعداد اکسیژن به ازای سیلیس افزایش یافته و این امر منجر به گسستگی در شبکه می‌شود. گرانروی شیشه و مقاومت شیمیائی آن کاهش یافته و در مقابل ضریب انبساط حرارتی افزایش می‌یابد. برای بهبود و جبران وضعیت این مشکل، اکسیدهای پایدارکننده مانند اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم به شیشه افزوده می‌شود.

در مجموع برای بهینه کردن کل این عملیات، تعیین دما و گرانروی در نقطه ذوب متناسب با مقادیر اکسیدها کاملاً محسوس است.

۲-۶-۷- تصفیه

بعد از مرحله ذوب و از بین رفتن ذرات جامد، مذابی از شیشه با تعداد بیشماری از حبابهای ریز و درشت حاصل می‌آید. این حبابها معمولاً حاوی گازهایی نظیر N_2 , SO_2 , CO_2 , O_2 می‌باشند که ناشی از تجزیه کربناتها، انجام واکنشهای شیمیایی، یا هوای محبوس بین ذرات بار مواد اولیه (بیچ) هستند و لذا باید از مذاب خارج شوند. این حبابها بسته به اندازه قطر و شکل خود به نامهای حبابهای جوشی (Bubble)، حبابهای ریز و سوزنی (Seed) و حبابهای تاولی (Blister) خوانده می‌شوند. برای از بین بردن حبابها، مکانیزمهای مختلفی بیان گردیده است.

یکی از مکانیزمهای مؤثر، فراهم آوردن زمینه صعود حبابها به طرف سطح مذاب و خارج شدن از آن می‌باشد.

سرعت صعود حباب از درون مذاب شیشه از معادله استوک پیروی می‌کند (معادله ۷-۳):

$$V = \rho D^2 g / 12\mu \quad (7-3)$$

که در این فرمول، پارامترها عبارتند از :

V : سرعت صعود حباب

ρ : دانسیته مذاب شیشه

g : شتاب ثقل

D : قطر حباب

μ : گرانروی مذاب

همانگونه که ملاحظه می‌شود فاکتورهای اصلی، گرانروی مذاب و قطر حباب می‌باشند (ρ و g ثابت هستند). سرعت بالا آمدن حبابها با گرانروی نسبت معکوس و با مجذور قطر حباب نسبت مستقیم دارد و هر چه درجه حرارت بیشتر و گرانروی کمتر گردد، سرعت صعود حباب افزایش می‌یابد.

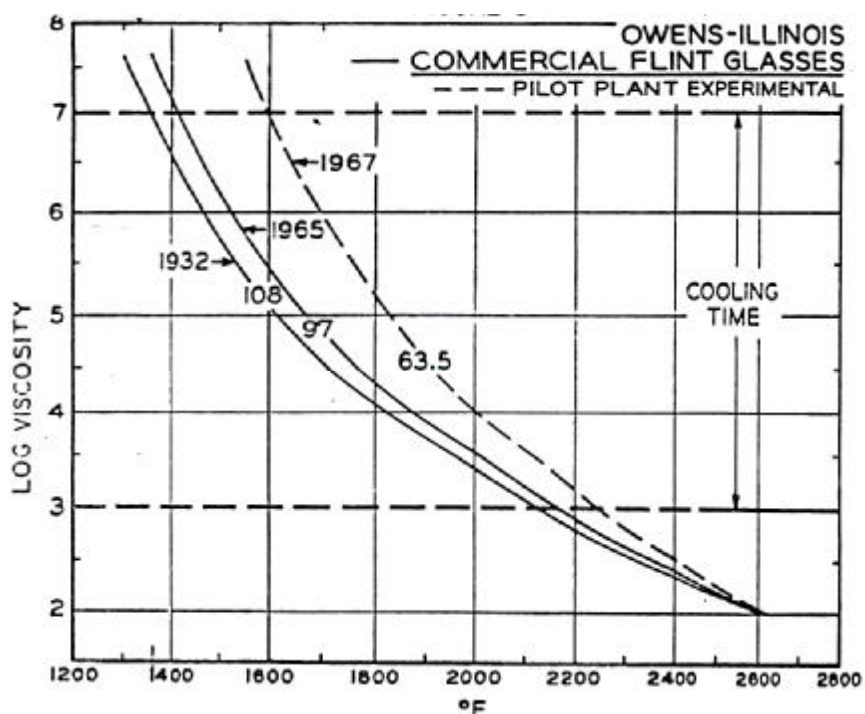
۳-۶-۷- شکل‌دهی

یکی از فاکتورهای مهم در عملیات شکل‌دهی، زمان سرد شدن است. زمان سرد شدن، مدت زمان لازم برای تغییر گرانروی شیشه از ($Logh = 3$) به ($Logh = 7$) است و شاخصی از سرعت تولید ماشینهای شکل‌دهی بشمار می‌آید. هر چه این زمان کوتاهتر باشد، بازدهی دستگاه بیشتر است (به شکل‌های (۷-۳) و (۷-۴) مراجعه شود).

در صورت موجود بودن آنالیز شیشه و محاسبه گرانروی در نقاط کارپذیری ($Logh = 3$) و قوام‌پذیری ($Logh = 7$)، می‌توان زمان سرد شدن را برای هر ترکیب با توجه به نمودار شکل (۷-۵) بدست آورد. یکی از کاربردهای عملی تعیین گرانروی شیشه، تغییر در ترکیب شیشه به منظور کاهش زمان سرد شدن و افزایش سرعت ماشین‌های شکل‌دهی است.

افزایش میزان اکسید آلومینیم و اکسید منیزیم و کاهش متقابل اکسید سدیم در ترکیب مواد اولیه، شرایطی را بوجود می‌آورد که از یکسو به کاهش زمان سرد شدن و بالا رفتن راندمان تولید می‌انجامد و از سوی دیگر باعث پایین آوردن سرعت گیرش شیشه و شکل پذیری بهتر و استحکام شیمیایی بیشتر می‌گردد. همچنین با این تغییر، میزان کرنات سدیم کمتری مصرف می‌گردد که در تقلیل هزینه‌ها بسیار سودمند است.

از شکل (۷-۳) پیداست که هر چه شیب منحنی گرانبوی - دما ملایم تر می‌شود، زمان سرد شدن نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۷-۳): منحنی گرانبوی - دما

۷-۶-۴- تنش زدایی

به خاطر وجود گرادیان حرارتی بین سطح مذاب تا مرکز آن و ضریب هدایت حرارتی پایین در شیشه به هنگام سرد شدن، تنش ایجاد می‌شود.

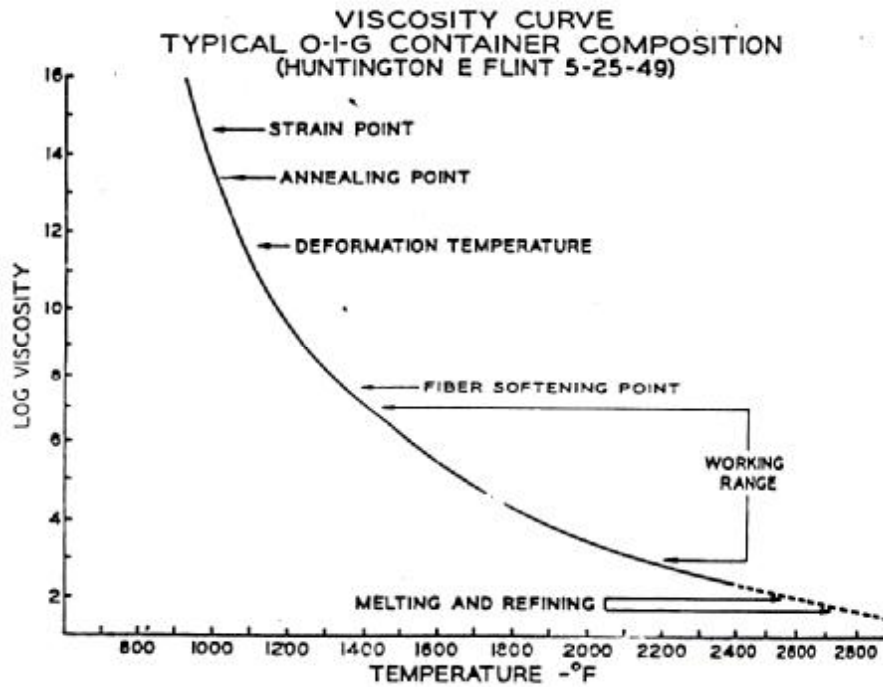
استاندارد تنش مجاز در داخل شیشه‌های معمولی حدود ۳۷۵ Psi است. برای آزاد ساختن تنش در شیشه، ابتدا باید دمای اولیه نقطه تنش زدایی (درجه حرارت در Annealing Pot) و سپس سرعت سرد کردن را محاسبه نمود و برای گرمخانه‌های تنش زدایی، منحنی حرارتی مناسب را اعمال کرد.

دمای اولیه نقطه تنش زدایی (T.A.P) نسبت به ضخامت شیشه (a) از رابطه (۷-۴) بر حسب درجه سانتیگراد بدست می‌آید:

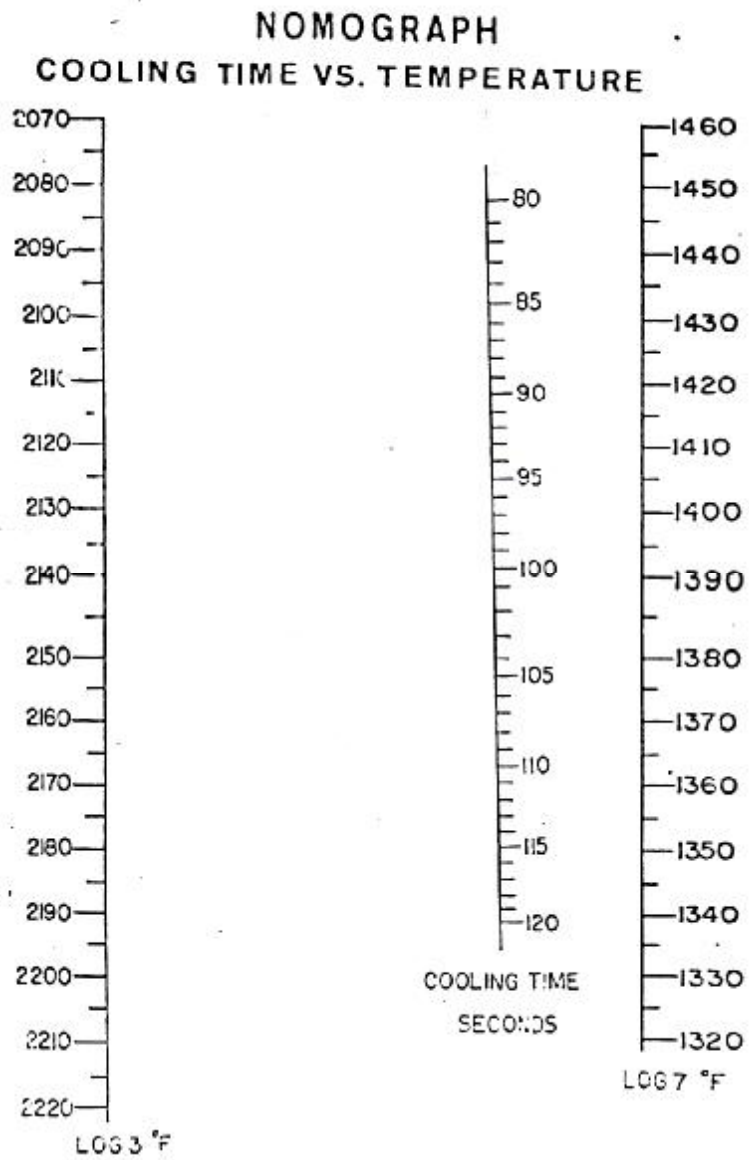
$$T.A.P = 29.95(17.89 - Lna)$$

(۷-۴)

که a بیشترین ضخامت شیشه بر حسب سانتی متر است.
 اما این یک رابطه کلی است و دمای اولیه نقطه تنش زدایی (T.A.P) به ترکیب شیشه وابسته است.
 در کنار رابطه (۷-۴) می توان از روش تئوری محاسبه گرانروی شیشه در نقاط تنش زدایی ($Logh = 13$) و کرنش ($Logh = 14.6$) استفاده نمود و منحنی حرارتی دقیق تری بر گرمخانه های تنش زدایی اعمال کرد.



شکل (۷-۴): منحنی گرانروی - دما



شکل (۵-۷): نمودار زمان سرد شدن بر حسب درجه حرارت