

به نام خدا

موضوع : قالبگیری تزریقی

Injection Molding

استاد : دکتر سعید بازگیر

تنظیم کننده : امیرحسین نجاری

۹۳۰۳۹۵۶۶۰

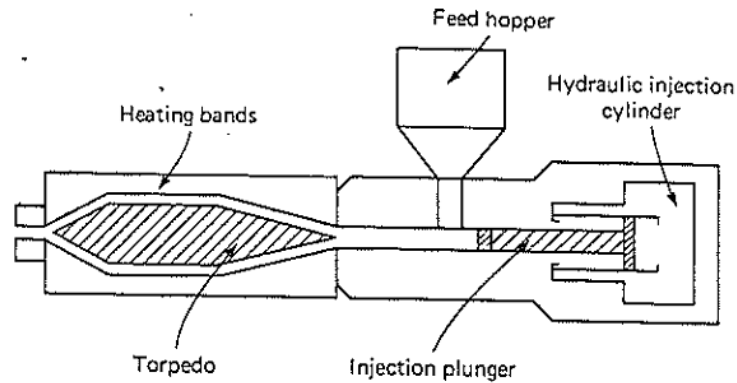


بهار ۹۴

تاریخچه :

یکی از راحت ترین و پر مصرف ترین و مهم ترین روش های رایج برای شکل دادن به پلیمرها (بسپارها) استفاده از ماشین تزریق است. پس از پیدایش و توسعه پلاستیک ها تلاش ها برای ساخت دستگاه هایی که بتوان به وسیله آنها به سادگی مواد اولیه پلاستیک را به شکل دلخواه در آورد آغاز شد و به اختراع ماشین تزریق انجامید. اما قبل از ساخت ماشین های تزریق مدرن امروزی، کار شکل دهی به پلاستیک ها خیلی مشکل بود ابتدا قالب هایی با صرف دقت و زحمات بسیار تهیه می شد و در گیره های دستی تعبیه می شد و سیلندری با پیستون روی آن نصب می گردید و اطراف سیلندر را با شعله های آتش، گرم می کردند و پس از ذوب شدن مواد، با فشار فلکه بالای پیستون مواد داخل سیلندر به داخل قالب، تزریق می شد و پس از سرد شدن مواد داخل قالب، گیره ها را باز و تکه های قالب را از هم جدا و محصول تولید شده را از آن خارج می کردند و تمام این مراحل با دست انجام می شد، تا زمانی که ماشین های تزریق مدرن امروزی تولید شدند. اولین دستگاه تزریق که به صورت ابتدایی کار می کرد در آمریکا و در سال ۱۸۷۲ ساخته شد و اولین ماشین تزریق پیشرفته و دارای پیچ نیز در سال ۱۹۴۶ در آمریکا توسط جیمز واتسون (James Watson) به ثبت رسید. وظیفه اصلی دستگاه ماشین تزریق تبدیل مواد پلاستیک جامد (دانه های ریز یا گرانول های پلیمر) به پلاستیک سیال و روان و انتقال آن به قالب می باشد به نحوی که همیشه مواد سیال آماده تزریق داخل قالب باشند.

در ابتدا injection توسط Torpedo ها انجام می شد، Torpedo یک مندرل است که در داخل یک سیلندر قرار می گیرد و وظیفش ایجاد سطح تماس زیاد برای انتقال حرارت است. زیرا وقتی ماده ی پلیمری در داخل این سیستم قرار می گیرد باید ذوب شود و ذوب شدن نیاز به سطح تماس زیاد دارد. ولی ما اینجا با مواد پلیمری سر و کار داریم پلیمرها عایق های حرارتی خوبی هستند و در صنعت نیز یکی از کاربردهای پلیمرها به عنوان عایق های حرارتی می باشد ، بنابراین انتقال حرارت در مواد پلیمری وقتی ویسکوزیته خیلی بالا باشد به صورت convection (هدایتی) صورت نمی گیرد بلکه انتقال حرارت به صورت conduction (جابجایی) انجام می شود. ولی این فرایند منسوخ شد به دلیل اینکه روی مواد پلیمری که در تماس با مندرل بودند ذوب می شد یا حتی گاهی می سوخت ولی موادی که در داخل حضور داشتند به دلایلی که گفته شد هنوز خام بودند و یکنواختی حرارتی در کل مواد وجود نداشت.



بنابراین بهترین روش یکنواختی حرارتی با استفاده از اختلاط مواد بود. یعنی ایجاد یک آشفته‌گی و هم زدن مواد به این صورت که سیالی که به جداره‌ها چسبیده را وسط بیاریم و مواد خامی که در وسط قرار دارند را نزدیک جداره‌ها کنیم. بنابراین در سال ۱۹۴۶ جیمز واتسون نسل جدید ماشین قالبگیری تزریقی را با اضافه کردن یک نیروی محرکه که عمل آشفته‌گی را به خوبی انجام می‌دهد را ساخت. قطعه جدید در واقع پیچی بود که با چرخش خود علاوه بر ایجاد یکنواختی حرارتی، حرارت از طریق اصطکاک درونی مواد یعنی از طریق *shear viscous heat* انجام شود نه از المنت‌های حرارتی انجام شود. پلیمرها مواد ویسکوالاستیک هستند وقتی انرژی به این مواد وارد می‌شود مقداری از آن را ذخیره و بقیه انرژی را تلف می‌کنند که این اتلاف انرژی در اینجا به صورت حرارت صورت می‌گیرد. در صنعت هم پلاستیک‌ها را در دمای به عنوان مثال دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) وقتی در بنبوری می‌ریزند بعد از گذشت ۱۰ دقیقه انقدر دما بالا می‌رود که دیگر قابل لمس کردن نیست زیرا دما با یک اختلاط ساده و ایجاد اصطکاک در مواد حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد رسیده است.

در نتیجه مشکل یکنواختی حرارت در ماشین‌های قالبگیری تزریقی نسل جدید با اضافه کردن یک پیچ حل شد و به مرور زمان دستگاه‌های قالبگیری پیشرفت‌های دیگری را داشتند و بعد از آن به دلیل بوجود آمدن تکنولوژی‌های جدید و نیاز به قطعات پلاستیکی کوچک (وزن کمتر از ۰,۱ گرم) مثل قطعات تلفن همراه، قطعات کوچک کامپیوترها و ... نیاز به دستگاهی که بتواند این قطعات کوچک را تولید کند به وجود آمد و دستگاه قالبگیری تزریقی میکرو نیز ساخته شد کارکرد این دستگاه‌ها تقریباً شبیه دستگاه‌های قالبگیری تزریقی معمولی بود با یکسری از تفاوت‌ها که این دستگاه هم شامل تغییرات در جهت بهبود عملکرد شد و سپس در سال‌های اخیر دستگاه قالبگیری تزریقی سه بعدی (3D) به بازار عرضه شد تا روند تغییرات دستگاه قالبگیری تزریقی یک گام دیگر به جلو برود.

مقدمه :

انواع Molding :

Injection molding

Thermoforming

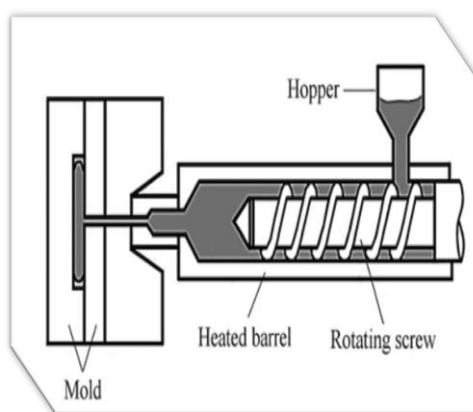
Compression molding

Blow molding

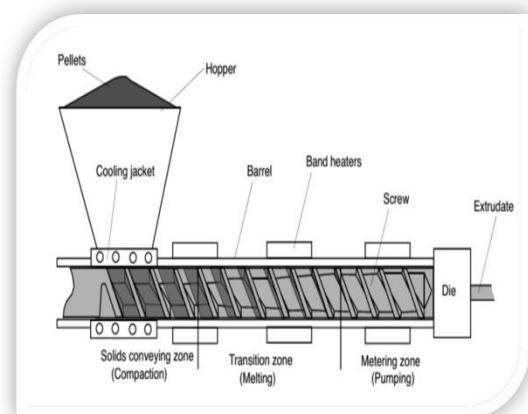
Rotation molding

شباهت ها و اختلافات دستگاه قالبگیری تزریقی با اکسترودر:

دستگاه تزریق با اکسترودر تقریبا از نظر ظاهری شبیه به هم هستند مثلا : هر دو دستگاه قیف (Hoper) دارند و گرانول ها از این قسمت وارد دستگاه می شود ، هر دو پیچ دارند که گرانول ها را ذوب و به جلو هدایت می کند ولی یک سری تفاوت های عمده در دو دستگاه وجود دارد که کاربردها را برای تولید قطعه متفاوت می سازد ، از جمله : پیچ ها شبیه هستند ولی کارکردها متفاوت است یعنی پیچ قالب گیری تزریقی کارکرد رانشی دارد و از دیگر تفاوت های این دو دستگاه ، قالبگیری تزریقی برای شکل دهی سیال پلیمری از قالب ها استفاده می کند ولی اکسترودر از یکسری دای برای شکل دهی در نتیجه دستگاه تزریق ناپیوسته و دستگاه اکسترودر پیوسته می باشد.



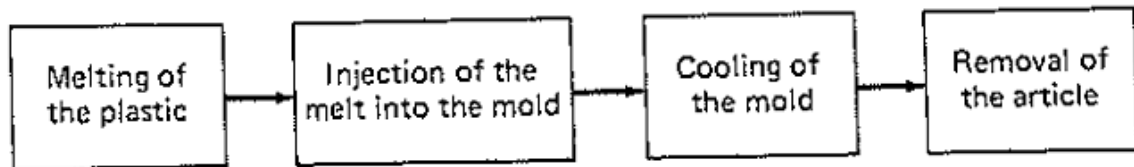
قالبگیری تزریقی



اکسترودر

مراحل فرایند قالب گیری تزریقی :

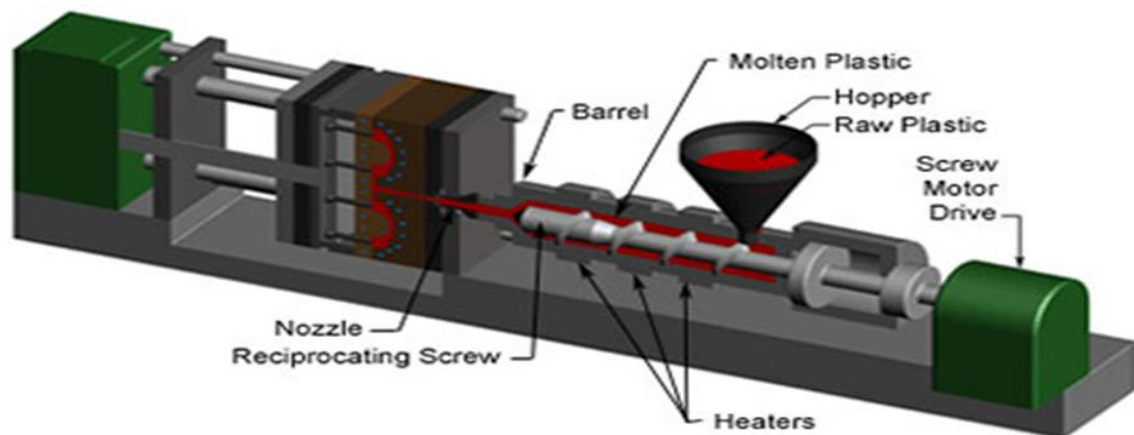
به صورت کلی فرایندی که در قالب گیری تزریقی رخ می دهد :



یعنی ذوب مواد پلاستیکی در مرحله اول و سپس تزریق مذاب به داخل قالب و سرد شدن قالب و قطعه و خارج شدن قطعه تولید شده از دستگاه و البته این فرایند به تعداد قطعه مورد نیاز تکرار پذیر است.

به صورت دقیق تر بخواهیم به این فرایند بپردازیم به این صورت است که :

ابتدا گرانول ها از قسمت Hooper وارد دستگاه شده و از طریق چرخش پیچ و المنت های حرارتی که روی barrel نصب شده مواد به صورت یکنواخت ذوب شده و در عین حال به جلو هدایت می شوند و در نهایت به شکل یک مذاب کاملاً یکنواخت و آماده تزریق به داخل قالب پشت قالب به مقدار تزریق جمع می شوند و در این زمان دیگر پیچ به شکل یک پیستون عمل می کند و سیال پلیمری را به داخل قالب هدایت می کند و قالب بسته شده و دیگر اجازه تزریق را نمی دهد پس از گذشت زمان قالب خنک شده و قطعه نیز کمی دما از دست داده و در نهایت قالب باز شده و قطعه به بیرون انداخته می شود.

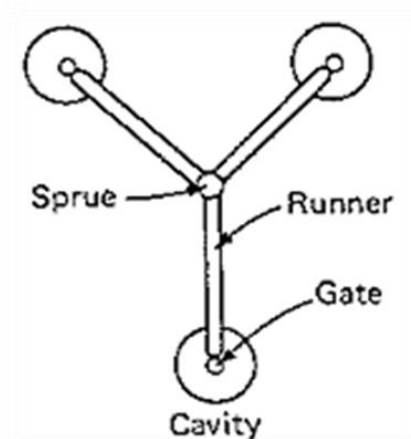
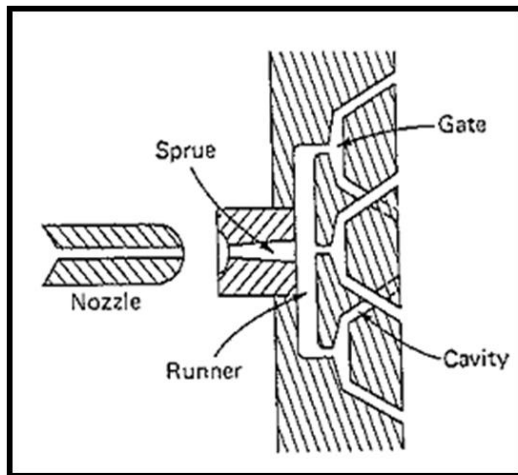


شماتیک یک قالب تزریق :

اجزایی که در قالب وجود دارند را در شکل زیر وجود دارد. به این صورت که سیال بعد از خروج از نازل وارد یک سری راهگاه می شود و سپس وارد ورودی شده و در نهایت وارد cavity که قطعه شکل نهایی خود را بگیرد در واقع sprue یک رابط است که ابعاده نسبت به gate و runner بزرگتر است و می تواند به صورت یک لوله هم باشد. و از لحاظ ابعادی نیز gate کوچکترین ابعاد را در سیستم دارد.

فشار در sprue بیشتر از nuzzle می باشد ولی از طرفی سرعت آن کمتر می باشد. سرعت که کم باشد ماهیت الاستیک ماده کمتر شده و سعی در ریلکس کردن پدیده های الاستیک ماده می شود و جریان آرام می شود.

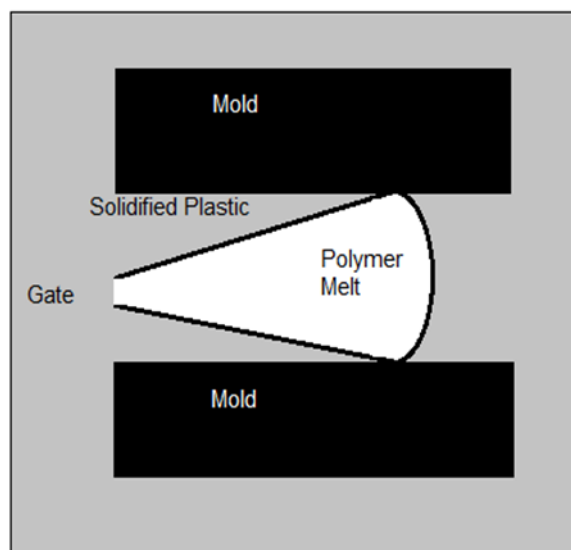
وقتی کریستال ها ذوب نشده به قالب می رسند باید دما را تا ۱۵ درجه سلسیوس بالای دمای ذوب برسانیم اگر نخواهیم از طریق حرارت الکتریکی یا conduction استفاده کنیم مجبوریم دور پیچ را بالا ببریم و بالا بردن دور پیچ یک سری مشکلات دارد یکی اینکه زمان اقامت ماده داخل پیچ کم می کند و باعث می شود که پدیده ی ذوب شدن را دوباره ببینیم ، بعضی اوقات هم لازم است که پیچ و barrel هم گرم شوند. تمام مکانیزم های پیشنهادی باعث بالا بردن سرعت تولید می شود.



پر شدن قالب :

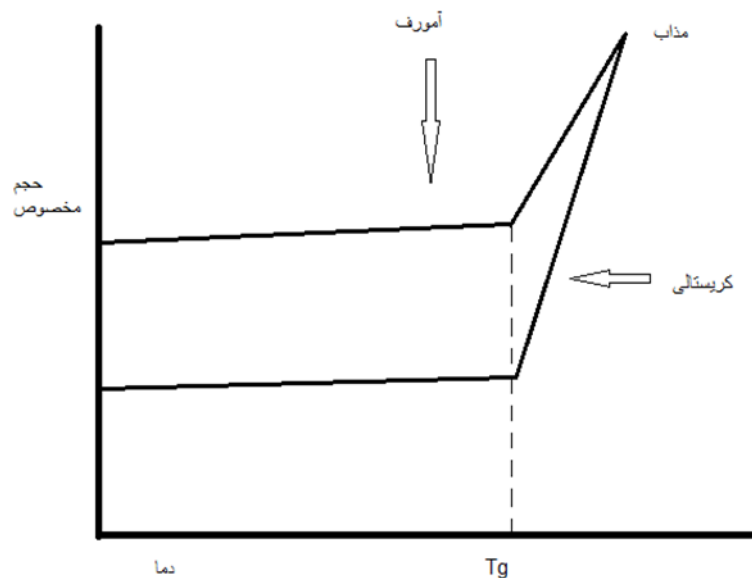
سرعت در یک واحد تزریق پس از گذشتن و عبور از sprue و gate و runner کم می شود و جریان آرام تر می شود و اتفاقاً این مورد برای ما مفید است زیرا می توانیم سرعت را در cavity کنترل کنیم و همچنین کنترلی رو نحوه ی پر شدن در cavity داشته باشیم چون اگر سرعت سیالی که وارد قالب می شود خیلی زیاد باشد پدیده flash اتفاق می افتد یعنی یک جت صورت می گیرد که به انتهای cavity با شدت می خورد و باعث پر شدن نایکناخت و نامنظم در cavity شده یعنی برخی جاهای و قسمت های قالب خالی می ماند و برخی جاهای دیگر پر می شود و شکل قطعه مورد نظر بدست نمی آید و قطعه تولید شده معیوب می شود.

در واقع بهترین حالت پر شدن قالب این است که به محض ورود به cavity اولین جایی را که پر می کند از جلو به سمت انتها حرکت کند ولی راهرو وسط باز است و سیال می تواند حرکت کند چون اون وسط معمولاً دمای بالایی دارد و در ابتدا بسته نمی شود و دائماً یک حرکت فواره ای برای پر کردن قالب دارد ، در نتیجه پر شدن همانطور که در شکل زیر وجود دارد ابتدا از جلو و از کناره ها شروع به پر شدن می کند به همین صورت تا انتها و در آخر آخرین جایی که پر می شود روبروی gate می باشد که در نهایت gate بسته شده و بعد از گذشت زمانی کوتاه که فرایند cooling انجام شد قالب باز شده و قطعه به بیرون انداخته می شود. کلاً سیالی که به دیواره های قالب چسبیده راحت تر دما از دست می دهد و حالت جامد به خود می گیرد. و روی دیواره ها کریستالیزاسیون و packing صورت می گیرد. و در دیواره ها ضخامتی از ماده جامد تشکیل شده که با گذشت زمان ضخامت سیال روی دیواره ها بیشتر و بیشتر شده تا قالب پر شود.



حال موضوع این است که packing چیست ؟

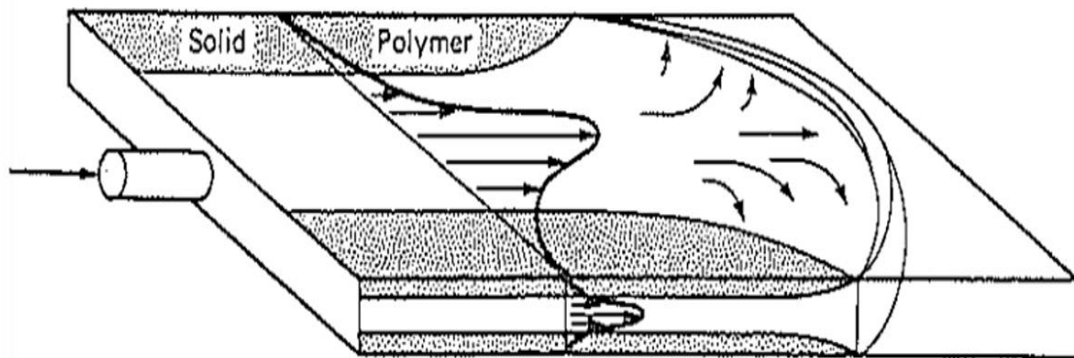
در واقع مواد پلیمری به دو دسته آمورف و کریستالی تقسیم می شوند و همانطور که در نمودار حجم مخصوص بر حسب دما برای یک مذاب پلیمری آمورف و کریستالی وجود دارد که مذاب پلیمری در هر دو حالت با کاهش دما با کاهش شدید حجم مخصوص مواجه می شود که این حالت تا دمای انتقال شیشه ای T_g وجود دارد و بعد از آن با کاهش دما کاهش حجم مخصوص تقریباً نداریم و ماده ثابت می شود البته این حالت یعنی کاهش حجم با کاهش دما را در همه مواد داریم یعنی انقباض مواد و در پلیمرها هم این حالت وجود دارد منتهی در مواد کریستالی کاهش حجم همانطور که در نمودار زیر مشاهده می شود نسبت به مواد آمورف شدیدتر است و یکی از دلایل هایی که قابل توجه است این است که در مواد کریستالی زنجیره های پلیمری به طور منظم کنار هم قرار گرفته و کاهش حجم در این مواد شدیدتر خواهد بود.



بنابراین اگر به اندازه حجم cavity ، یک حجم مذابی را وارد cavity کنیم بعد از این که قطعه و قالب دمایشان پایین آمد و قالب باز شد و قطعه به بیرون انداخته شد می بینیم که ابعاد قطعه از ابعاد قالب کوچکتر شده و اون ابعادی که مد نظر ما بود به دست نیامد و در واقع برای مواد کریستالی این حالت نیز شدید تر رخ می دهد ، که در این حالت می گوئیم پدیده shrinkage رخ داده که یک پدیده منفی به شمار می رود و برای حل این مشکل و جبران این کاهش حجم ماده اضافی با فشار وارد cavity شود و این فشار تا مدت زمانی (حدود چند ثانیه) حفظ شود. در نتیجه فشار داخل قالب بالا می رود که به این فشار holding pressure گفته می شود.

پروفایل سرعت :

همانطور که بیان شد وقتی قالب در حال پر شدن است وسطش دما بالاست و مذاب می تواند از این راهروی به وجود آمده حرکت کند و گوشه های قالب را پر کند و جلو برود. همانطور که می دانیم ما با زنجیرهای پلیمری سرکار داریم وقتی مواد روی جداره ها قرار می گیرند به مرور دما از دست می دهند و جامد می شوند و چون هر زنجیره با زنجیره کناری اش entanglement دارد می تواند یک نیرو با توجه به شکل به سمت چپ (خلاف جهت حرکت رو به جلو سیال) اعمال کند و ایجا یک حرکت جریان به سمت چپ کند و در نهایت پروفایل سرعت به شکل زیر داشته باشیم که در اواسط قالب پروفایل سرعت به صورت ماکسیمم رو به جلو و هر چه به دیواره ها نزدیک می شویم پروفایل سرعت کوچکتر شده و در تماس دیواره ها یک پروفایل سرعت کوچک مخالف جهت پروفایل سرعت در وسط جریال سیال داشته باشیم.



البته به جز عامل گره خوردگی زنجیره ها ، عوامل جامد شدن و کاهش حجم نیز بی تاثیر نیست ، وقتی مذاب جامد می شود خمیری شبیه خلا ایجاد می کند و همین باعث حرکت سیال به سمت چپ می شود تا کاهش حجم را جبران کند.

نحوه ی اورینته شدن زنجیرهای پلیمری در قالب گیری تزریقی به این صورت است که : چون در قالب گیری تزریقی فشار زیاد است و سیال هم در مسیر رو به جلو حرکت می کند در آن جهت حرکت زنجیره های پلیمری اورینته می شوند و در دیواره ها به خواطر اصطکاک اورننه شدن زنجیره ها را شاهد هستیم و در وسط نسبت به دیواره ها اورینته شدن کمتر است و کلا در دو منطقه اورینته شدن زنجیره های پلیمری بیشتر و شدیدتر از دیگر ناحیه ها است یکی روی سطح و یکی در بالک ماده می باشد ، هر جایی که اورینته شدن زنجیره ها را داشته باشیم مواد در حالت ایزوتروپیک خارج می شوند. ماده ای که در یک جهت اورینته شده باشد نیز داریم مثل الیاف و فیلم ها .

سیکل قالب گیری تزریقی :

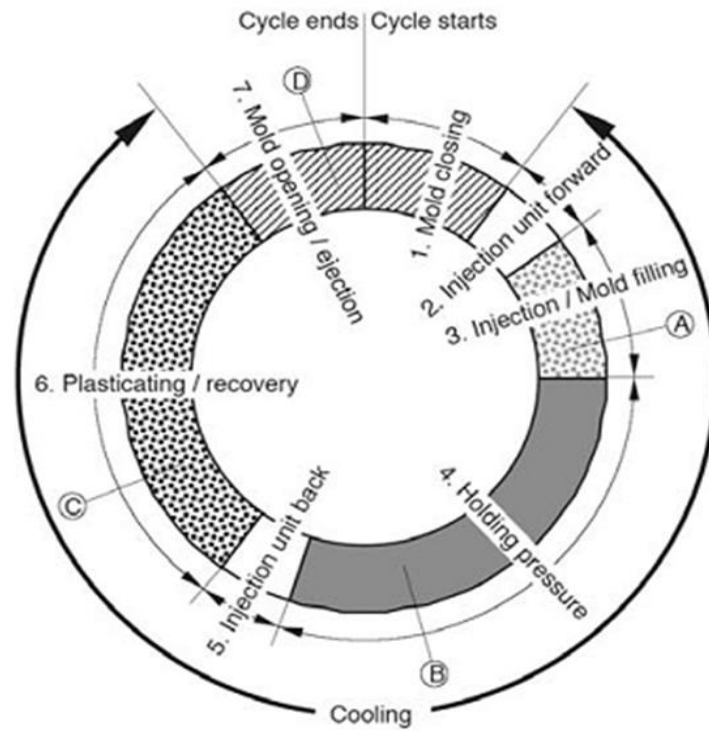
موضوعی که وجود دارد در سیکل فرایند قالب گیری تزریقی زمان تزریق تا زمان تزریق بعدی است و اینکه چقدر طول می کشد تا قالب پر شود.

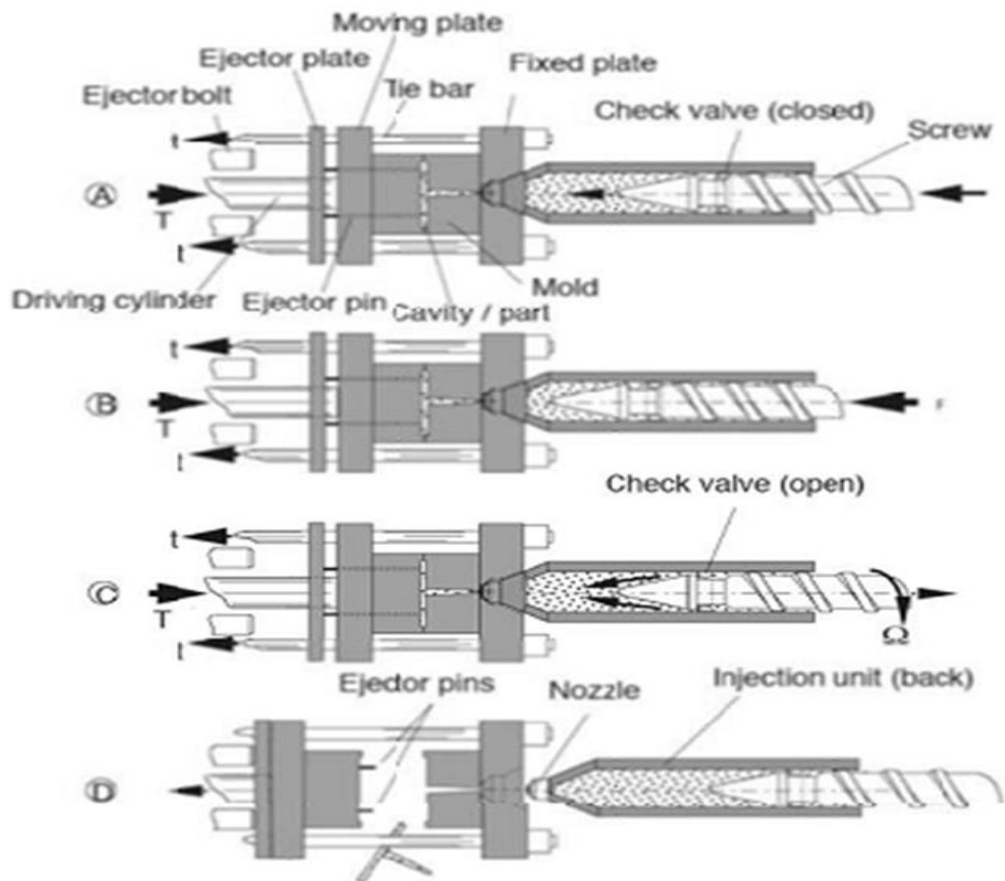
$$t_{cycle} = t_{closing} + t_{cooling} + t_{ejection}$$

یعنی مقدار زمانی که طول می کشد سیکل کامل شود و یک سیکل را طی کنیم.

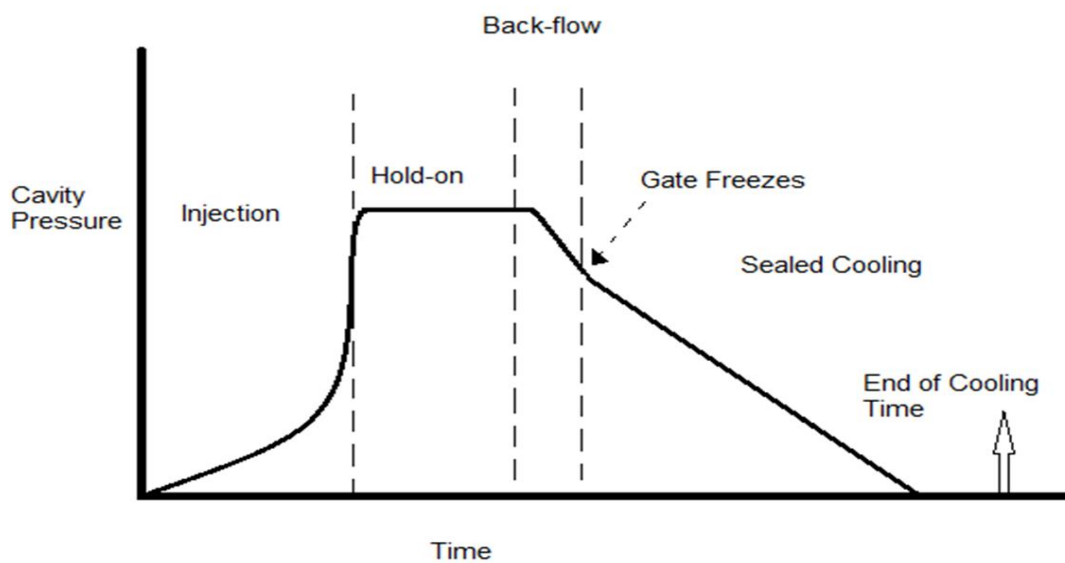
در سیکل قالبگیری تزریقی همانطور که در شکل زیر وجود دارد injection و بعد Hold on time داریم تا shrinkage ماده برطرف شود که در واقع کم شدن زمان را با دادن زمان حل می کنیم . بعد مرحله ی cooling را داریم وقتی cooling شروع می شود پیچ به عقب بر می گردد و شروع به کار کردن می کند تا زمانی که قالب باز

شود و زمانی که قالب باز می شود و قطعه به بیرون eject می شود و قالب بسته می شود برای سیکل بعدی ، همه ی این مراحل زمان بر است و ما در صنعت دنبال این موضوع هستیم که زمان سیکل را حداقل مقدار ممکن برسانیم البته با حفظ کیفیت محصول .





بنابراین تغییر فشار با زمان با توجه به مواردی که گفته شد به صورت زیر است :

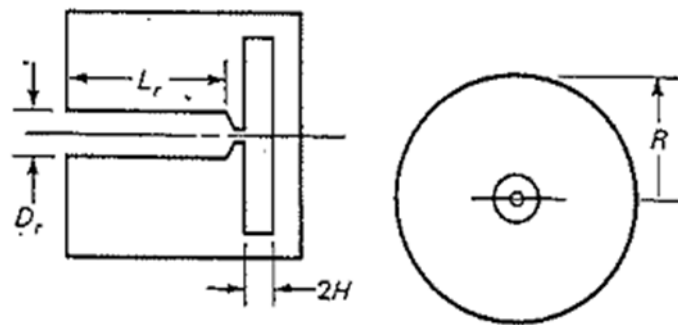


مدل سازی :

جریان نیوتونی ایزوترمال یک سیال پلیمری داخل یک cavity :

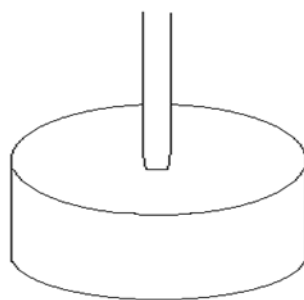
زمانی که سیال به انتهای قالب برسد زمان پر شدن قالب است و gate بسته می شود محاسبه این زمان برای مهم است .

فرض می کنیم که شکل زیر یک رانر است (اندیس r) ، سیال در داخل رانر جلو می آید و به gate و در نهایت به cavity می رسد که شکل cavity که ما در اینجا جریان را در آن مدلسازی می کنیم شکل دیسک است .

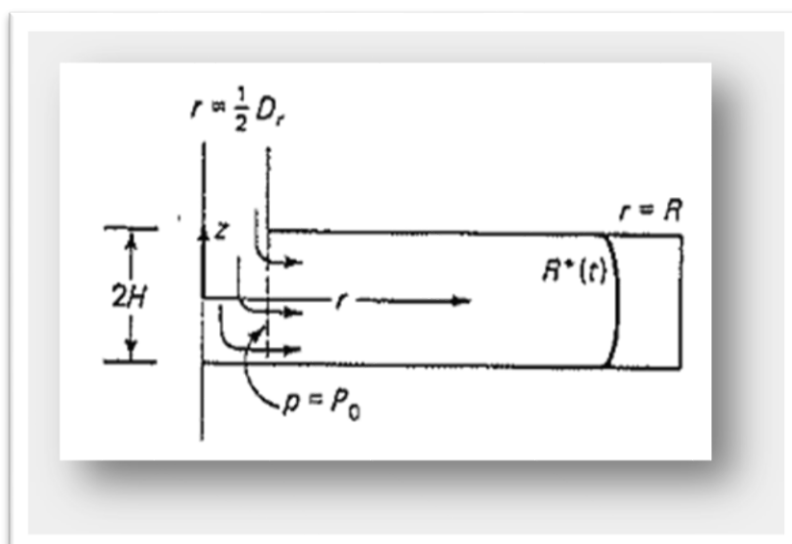


و محور مختصاتی که کار می کنیم محور مختصات استوانه ای است .

بین دو دیسک یک فاصله ای وجود دارد که سیال از وسط دیسک وارد می شود و فاصله ی بین صفحات $2H$ است.



در شکل اولی نصف runner و cavity را در نظر می گیریم و از تغییر قطر از runner به gate صرف نظر می کنیم .



$R^*(t)$: شعاع لحظه ای و موقعیت مکانی جلوی سیال در هر لحظه که با زمان تغییر می کند.
بنابراین :

$$\frac{1}{2} D_r \leq r \leq R$$

$$-H \leq Z \leq H$$

و بردار سرعت هم با توجه به اینکه جریان فقط در جهت r داریم به صورت زیر است :

$$u = [u_r(r, z, t), 0, 0]$$

و فرض u به r و z و t ربط دارد.

برای شروع از معادلات پیوستگی استفاده می کنیم :

در محور مختصاتی استوانه ای :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \rho u_\theta + \frac{\partial}{\partial z} \rho u_z = 0$$

که در نهایت :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r u_r = 0$$

این رابطه را رابطه ۱ می نامیم که بعدا از آن استفاده کنیم .

حال با استفاده از معادلات دینامیکی (مومنوم) (برای مولفه r) :

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

در سیالات نیوتونی تنش های نرمال برابر صفر است.

$$\tau_{rr}=0$$

$$\tau_{\theta\theta}=0$$

و ترم ρg_r با توجه به اینکه سیال تحت تاثیر وزن خود حرکت نمی کند و به خواطر اعمال نیرو از پیچ سیال حرکت می کند بنابراین این ترم نیز صفر است .

با استفاده از جداول (برای سیالات نیوتونی) :

$$\tau_{rz} = \mu \frac{\partial u_r}{\partial z}$$

و در نهایت با قرار دادن در معادله ساده شده معادله مومنوم :

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)$$

این ترم را ترم اینرسی می نامیم.

این معادله بدست آمده را معادله ۲ می نامیم .

در معادله ۱ داشتیم :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r u_r = 0$$

که این معادله از ضرب دو ترم $\frac{1}{r}$ در $\frac{\partial}{\partial r} r u_r$ تشکیل شده که برابر صفر شده است بنابراین یکی از این دو ترم باید صفر باشد تا معادله کلاً برابر صفر شود ، ترم $\frac{1}{r}$ که صفر نمی شود بنابراین $\frac{\partial}{\partial r} r u_r$ باید صفر شود.

$$\frac{\partial}{\partial r} r u_r = 0$$

که در نتیجه :

$$u_r = \frac{1}{r} C(z, t)$$

که u_r یک تابع مستقل از r می شود. و u_r تابع z و t (زمان) است. یعنی سرعت در شعاع دیسک با زمان و z تغییر می کند چون روی دیواره ها سرعت صفر است و به مرکز می رویم سرعت ماکسیمم می شود. با قرار دادن در رابطه ۲ به شرطی که ترم اینرسی سیستم را صفر در نظر بگیریم (ترم اینرسی در مقابل ترم سمت راست قابل صرف نظر است) :

$$0 = -\frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

پس از بازنویسی و مرتب کردن معادله داریم :

$$\frac{r}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial r} = \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = A(t)$$

$\frac{r}{\mu} \frac{\partial \rho}{\partial r}$ به r وابسته است و $\frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$ به z وابسته است .

که هر دو ترم به یک ثابت A که به یک t ارتباط دارد برابر می باشند.

با توجه به شرایط مرزی که داریم :

$$u = 0 \quad @ \quad z = \pm H$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial z} = 0 \quad @ \quad z = 0$$

$$P = P_0 \quad @ \quad r = \frac{1}{2} D_r$$

با حل معادلات (انتگرال گیری) با توجه به شرایط مرزی :

$$c = -\frac{AH^2}{2} \left[1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right]$$

$$P - P_0 = A\mu L n \frac{2r}{Dr}$$

قبل از هر چیز A را می خواهیم بدست بیاوریم :

می دانیم ، دبی برابر حاصلضرب سرعت در مساحت مقطع :

$$Q = U.A$$

$$Q = 4\pi HR^* \frac{dR^*}{dt}$$

$$Q = 4\pi \int_0^H ru_r dz$$

$$A = -\frac{3Q}{4\pi H^3}$$

حال دو حالت برای ادامه در نظر می گیریم :

۱. فشار ثابت

۲. نرخ جریان (دبی) ثابت

فشار ثابت :

$$P_0 = cte$$

$$P_{at R^*} = P_{atm} = 0$$

با جایگذاری دو معادله $Q = 4\pi HR^* \frac{dR^*}{dt}$ و $A = -\frac{3Q}{4\pi H^3}$ در معادله زیر :

$$-P_0 = A\mu L n \frac{2R^*}{Dr}$$

معادله زیر بدست می آید :

$$\varphi^2 \ln \varphi - \frac{1}{2}(\varphi^2 - 1) = \frac{2Bt}{a^2}$$

که ساده شده ی :

$$a = \frac{D_r}{2R} \quad \varphi = \frac{2R^*}{D_r} \quad B = \frac{H^2 P_0}{3\mu R^2}$$

در $R=R^*$ و $\varphi = \frac{1}{a}$:

$$\frac{1}{a^2} \ln \frac{1}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1 \right) = \frac{2Bt^*}{a^2}$$

با طرفین وسطین و آوردن t^* به یک طرف معادله و پس از ساده سازی :

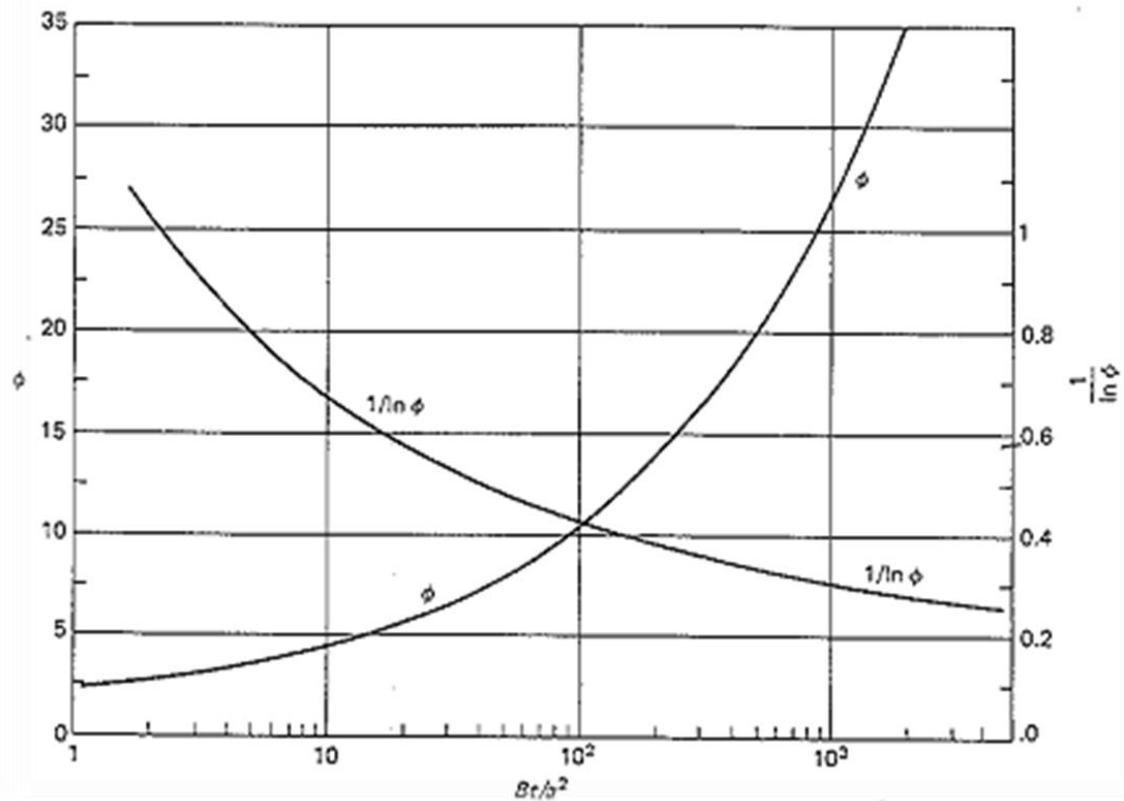
$$t^* = \frac{1}{2B} \left[-\ln a - \frac{1}{2} (1 - a^2) \right]$$

زمان پر شدن در فشار ثابت به این صورت بدست می آید .

موقعیت پیشرفت جریان و نرخ جریان حجمی (دبی Q) بر حسب تابعی از زمان :

$$\frac{3\mu Q}{4\pi H^3} = \frac{1}{\ln \varphi} = f \left(\frac{Bt}{a^2} \right)$$

این دو ترم تابعی از $\frac{Bt}{a^2}$ هستند . که نمودار $\frac{1}{\ln \varphi}$ بر حسب $\frac{Bt}{a^2}$ رسم شده است .



در واقع ϕ همان $\frac{2R^*}{D_r}$ است یعنی نسبت شعاع لحظه ای یا موقعیت مکانی جلوی سیال در هر لحظه به قطر رانر است.

که در این نمودار با افزایش ϕ نسبت $\frac{1}{\ln \phi}$ با گذشت زمان کاهش می یابد. و برای ملموس شدن تغییرات ϕ با زمان نمودار ϕ نسبت به زمان به راحتی بدست می آید. و چیزی که مشاهده می شود تغییرات نمودار ϕ بر حسب زمان به صورت افزایشی می باشد و در واقع نشان دهنده این مطلب است که با گذشت زمان سیال در رانر حرکت کرده و یک روند افزایشی دارد.

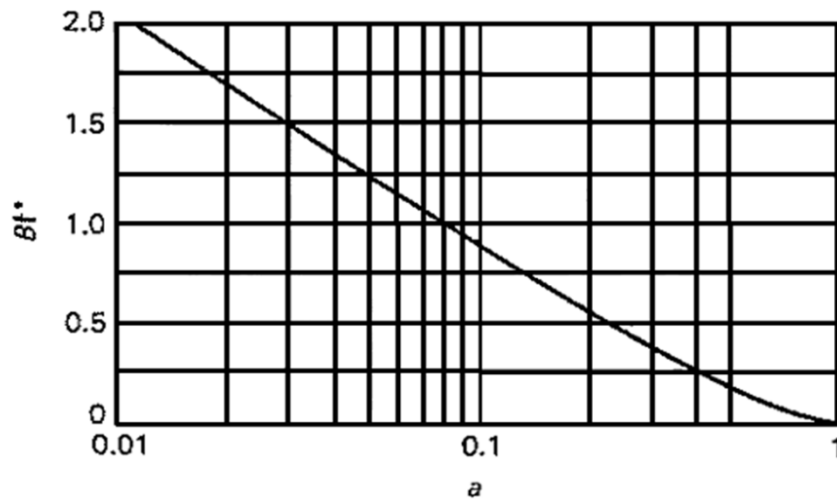
زمان پرشدن (زمان اقامت) به عنوان تابعی از فشار اعمال شده :

با توجه به رابطه زمان اقامت :

$$t^* = \frac{1}{2B} \left[-\ln a - \frac{1}{2}(1 - a^2) \right]$$

که :

$$a = \frac{D_r}{2R}$$



همانطور که نمودار نشان می دهد تغییرات زمان اقامت بر حسب a که نسبت قطر رانر به قطر CAVITY ، که با افزایش a زمان اقامت کاهش می یابد به صورت تقریباً خطی (ثابت) و این مطلب صدق می کند زیرا با افزایش قطر رانر مذاب راحتتر در رانر حرکت می کند و فشار کمتر شده و بدین ترتیب زمان اقامت کاهش می یابد ، با توجه به پروفایل سرعت که سرعت در وسط به صورت ماکسیمم است و در تماس با جداره ها سرعت کم می شود بنابراین هر چه پروفایل سرعت وسط رانر بزرگتر و بیشتر باشد سرعت جریان نیز سریع تر و بیشتر است.

دبی ثابت :

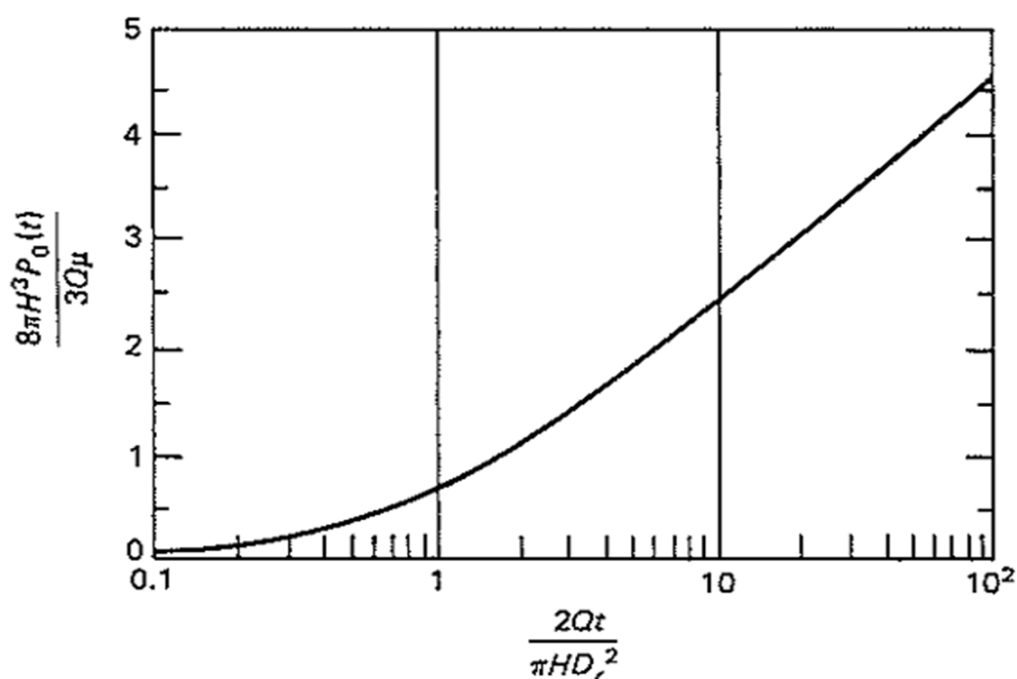
حالت بعدی که باید در نظر بگیری دبی ثابت می باشد.

$$Q=cte$$

$$t^*=(\text{Cavity Volume})/(\text{Volumetric flow rate})$$

$$t^*=\frac{2\pi H}{Q} \left(R^2 - \frac{D^2 r}{4} \right)$$

تغییرات فشار : پر شدن یک دیسک (سیال نیوتونی ایزوترمال) در نرخ جریان ثابت (دبی ثابت) :



تغییرات فشار بر حسب زمان و D_r نشان داده شده است که با گذشت زمان فشار در cavity بیشتر شده که این انتظار هم می رفت این افزایش از یک مقداری به بعد به صورت خطی تغییر می کند که مربوط به قسمتی است که زمان را ثابت نگه داشتیم برای جلوگیری از پدیده shrinkage.

قالبگیری تزریقی میکرو :

در سال های اخیر ، یک روند روبه رشد تقاضا برای قطعات کوچک پلاستیکی یا حتی در مقیاس میکرو وجود داشته است و این روند ساخت ماشین هایی که بتوانند این قطعات را تولید کنند اهمیت رو به رشدی داشته است. قابلیت های فرایند ساخت قطعات میکرو باید گسترش یابد و در برگیرنده محدوده وسیع تری از مواد و فرم های هندسی باشد تا

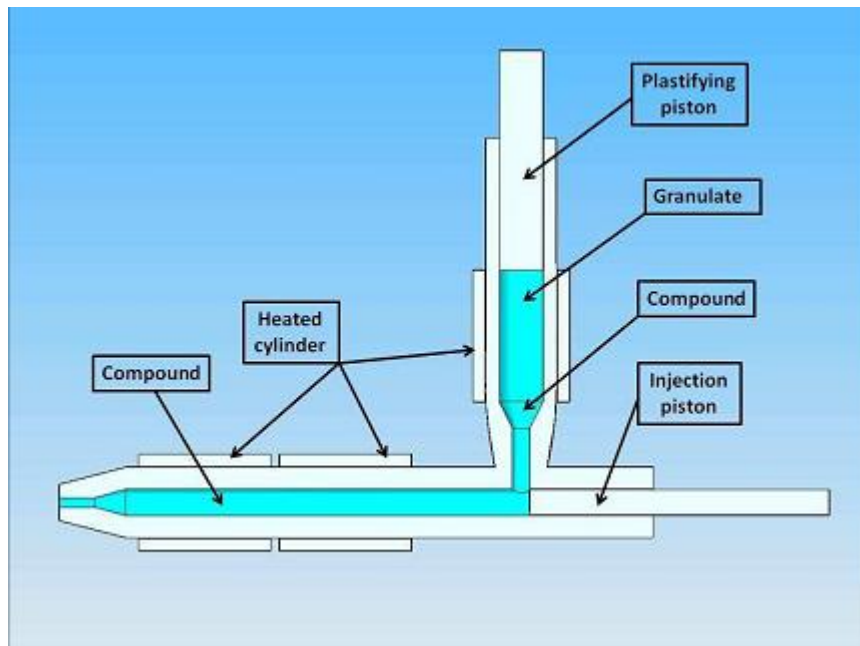
بتواند پاسخگوی نیاز مشتری ها و محصولات جدید در حال ظهور باشد. زیرا یک کنترل فرایند دقیق برای کیفیت بالا در قالب گیری تزریقی این قطعات کوچک ضروری بود به ویژه از آنجا که وزن های شات (shot) کم می تواند مشکل ساز باشد .

قالبگیری تزریقی میکرو می تواند به عنوان یکی از تکنولوژی های کلیدی برای تولید قطعات میکرو باشد زیرا قابلیت تولید انبوه قطعات میکرو با هزینه تولید نسبتا کم داشته باشد.



دستگاه قالبگیری تزریقی میکرو :

شکل و ظاهر دستگاه تقریبا شبیه به دستگاه قالبگیری تزریقی میکرو می باشد . در طول فرایند ، مواد پلیمری به شکل گرانول وارد از طریق hooper (قیف) به یک واحد plasticizing (مواد در این ناحیه ذوب می شوند) انتقال می یابند . سپس سیال تحت فشار برای جبران shrinkage می شوند ، سپس پس از گذشت زمان کافی مواد خنک شده داخل قالب و به بیرون انداخته می شود و سیکل تکرار می شود.



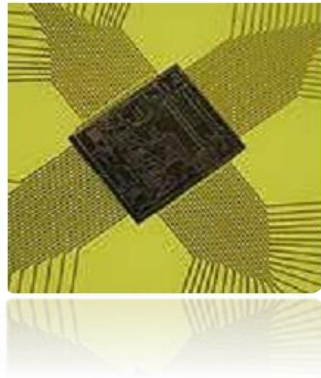
این نوع دستگاه ها از اواسط دهه نود ساخته شد و پس از آن تحقیقات وسیعی برای بهبود فرایند انجام شد. دسته بندی قطعات تولید شده بر اساس وزن قطعه پلاستیکی :

- ✓ قطعات میکرو با ابعاد بزرگ - وزن قطعه بیشتر از ۱۰ گرم .
- ✓ قطعات میکرو با وزن بین ۰,۱ تا ۱۰ گرم.
- ✓ قطعات دقیق میکرو با هندسه دلخواه با وزن بیشتر از ۵ گرم.
- ✓ قطعات میکرو با ابعاد خیلی کوچک و وزن زیر ۰,۱ گرم.

کاربرد های قطعات پلاستیکی میکرو در صنایع :

امروزه قطعات میکرو به طور وسیعی استفاده می شوند و با توجه به کاربردهای در صنایع مختلف دسته بندی می شوند.

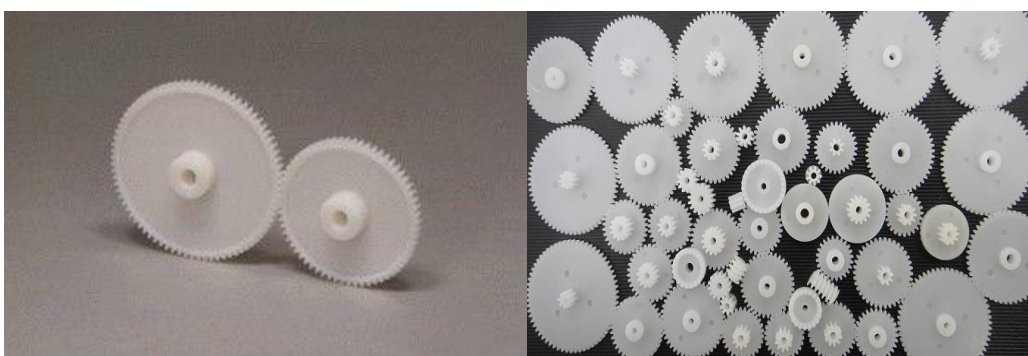
تراشه سیستم های میکرو مکانیکی (MEMS)



تراشه عصبی توسعه یافته



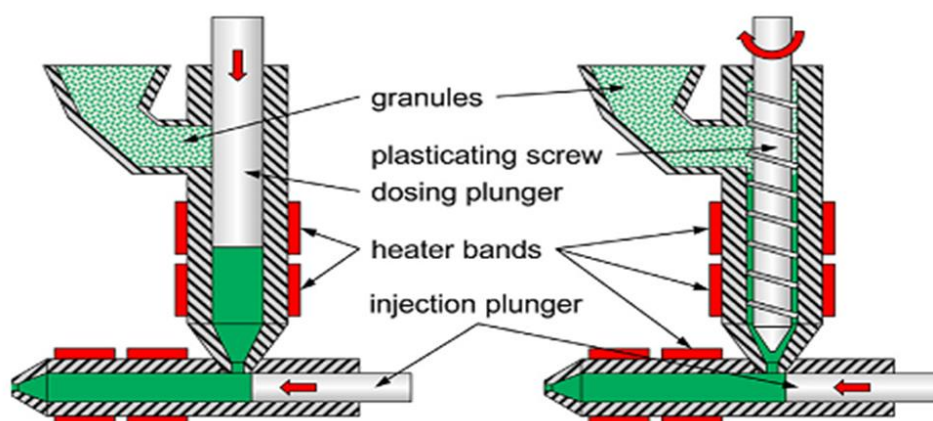
چرخ دنده های میکرو : برای کاربرد های مختلف مثلا برای صنعت ساعت سازی



در پزشکی : میکرو فیلتر برای سمعک ، قطعات کاشتنی پلیمری در بدن و ...
صنایع الکتریکی و بصری : قطعات کوچک استفاده شده در تلفن همراه و کامپیوتر ها و

پلاستیسایزینگ جدید برای افزایش کارایی و کاهش زمان اقامت در دستگاه قالبگیری تزریقی میکرو :

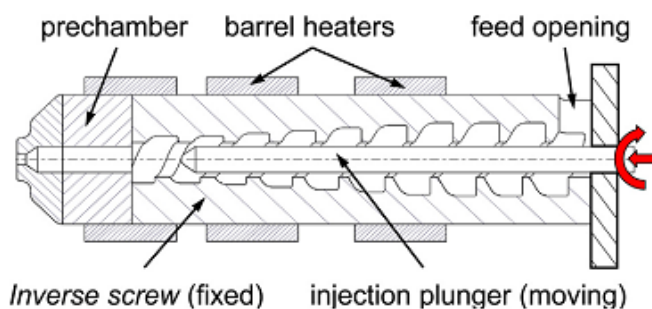
به منظور دستیابی به تولید بالا در قالبگیری تزریقی میکرو یک کنترل فرایند خیلی خوب مورد نیاز است . بعلاوه ، برای یک تولید اقتصادی کاهش زمان اقامت و ریسک تخریب حرارتی مواد لازم و ضروری است . مهمترین خصوصیات این سیستم ها کاهش حداقل مقدار تزریق می باشد. که با یکسری موقعیت یابی دقیق تر و کنترل فرایند بهتر ، مقدار کلی مذاب به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. و در نتیجه روی زمان سیکل فرایند تزریق نیز تاثیر گذاشته و زمان کوتاه تر می شود.



دو نوع دستگاه قالبگیری تزریقی میکرو که در نوع سمت چپ کاهش قابل توجه مقدار شات تزریق با دقت بالا از طریق یک پیستون تزریق و یک پیچ به طور قابل توجهی قطر کاهش میابد. ماشین های قالبگیری تزریقی پیچ پیستون همچنین توزیع حرارتی یکنواخت و یکنواختی مواد که برای واحد پلاستیسایزینگ مفید است را ارائه می دهند.

استفاده از پلاستیسایزینگ جدید در دستگاه تزریق :

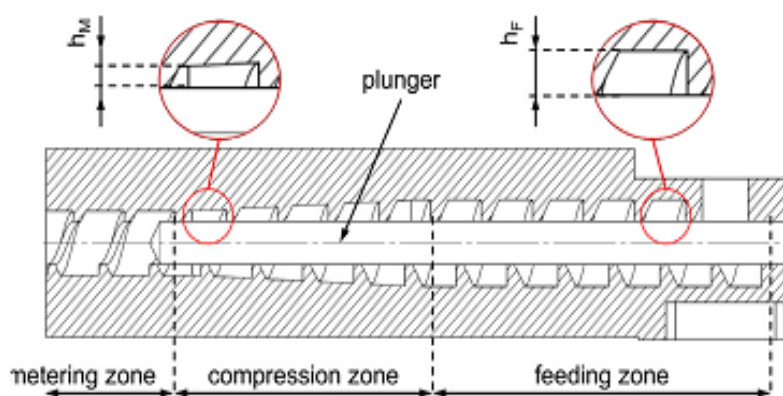
در طی همکاری موسسه تولید پلاستیک (IKV) در دانشگاه RWTH Aachen (دانشگاه فنی آخن در کشور آلمان) با شرکت Aburg GmbH +co (یکی از سازندگان ماشین های تزریقی) پلاستیسایزینگ طراحی کردند که باعث افزایش عملکرد و کارایی و کاهش زمان اقامت شد.



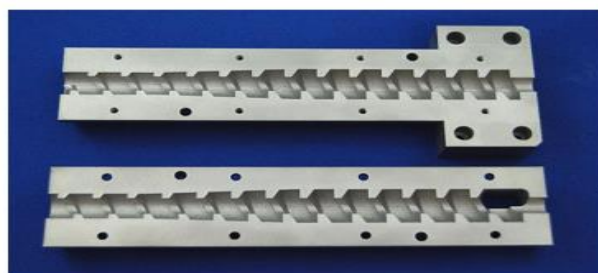
در واقع این پلاستیسایزینگ به صورت پلکانی طراحی شده و پیستون در فضای بین این ناحیه قرار می گیرد. برای طراحی اولیه واحد پلاستیسایزینگ معیارهای طراحی برای Elbe یک هندسه سیلندر کوچک است. شرایط هندسی در جدول و شکل زیر آورده شده است.

Table 1
Geometrical parameters.

Parameter	Value (mm)
Screw length, L_S ($20d_i$)	160
Feed zone, L_F ($0.5L_S$)	80
Compression zone, L_C ($0.3L_S$)	48
Metering zone, L_M ($0.2L_S$)	32
Depth of thread	
Feed zone, h_F	4
Metering zone, h_M ($0.5h_F$)	2
Pitch, t ($0.7D$)	11.2



برای دسترسی بهتر به داخل این واحد دستگاه آن را از دو قسمت ساخته شد :



همچنین اجازه تمیز کردن سطح داخلی این ناحیه را پس از استفاده به منظور کاهش زبری سطح به اپراتور می دهد.