فهرست

دیباچه

بخش اول: مبانی کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت

۱ مواد و چرخه ساخت

۱–۱ مقدمه ۳
۱–۲ بستر ٤
۱–۳ تقویت‌کننده‌ها ۳۰
۱–٤ چرخه ساخت ۵۸

۲ نفوذپذیری تقویت‌کننده

۲–۱ مقدمه ۹۸
۲–۲ مدل شعاع هیدرولیکی ۹۹
۲–۳ مدل رفتار تراکم‌پذیری ۱۰۲
۲–٤ مدل تقریب روانسازی ۱۰٤
۲–۵ مدل خودسازگار ۱۰٤
۲–٦ مدل ترکیبی ۱۰۵
۲–۷ تعیین تجربی ضریب نفوذپذیری ۱۰٦

۳ تشکیل و رشد حباب

۳–۱ مقدمه ۱۰۸
۳–۲ تشکیل حباب و پایداری تعادلی ۱۰۹
۳–۳ رشد حباب در اثر پدیده نفوذ ۱۱٤
۳–٤ انتقال حباب و رزین ۱۲۷

٤ معادلات حاکم بر فرآیندهای ساخت

٤–۱ مقدمه ۱۲۹
٤–۲ روش میانگین حجمی ۱۳۰
٤–۳ جریان رزین ۱۳۲
٤–٤ انتقال جرم ۱۳٤
٤–۵ انتقال گرما ۱۳۵

بخش دوم: فرآیندهای ساخت کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت

۵ فرآیند لایه‌گذاری دستی

۵–۱ مقدمه ۱۴۱
۵–۲ کاربردهای فرآیند لایه‌گذاری دستی ۱۴۳
۵–۳ مواد فرآیند لایه‌گذاری دستی ۱۴۴
۵–۴ روش فرآیند لایه‌گذاری دستی ۱۴۶
۵–۵ دستگاه فرآیند لایه‌گذاری دستی ۱۵۱
۵–۶ عوامل طراحی در فرآیند لایه‌گذاری دستی ۱۵۶
۵–۷ انواع دیگر فرآیند لایه‌گذاری دستی ۱۵۸

۶ فرآیند لایه‌پاشی

۶–۱ مقدمه ۱۵۹
۶–۲ کاربردهای فرآیند لایه‌پاشی ۱۶۱
۶–۳ مواد فرآیند لایه‌پاشی ۱۶۱
۶–۴ روش فرآیند لایه‌پاشی ۱۶۳
۶–۵ دستگاه فرآیند لایه‌پاشی ۱۶۵
۶–۶ انواع دیگر فرآیند لایه‌پاشی ۱۶۶

۷ فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته

۷–۱ مقدمه ۱۶۷
۷–۲ کاربردهای فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته ۱۶۹
۷–۳ مواد فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته ۱۶۹
۷–۴ روش فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته ۱۷۳
۷–۵ دستگاه فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته ۱۸۱
۷–۶ عوامل طراحی در فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته ۱۸۶
۷–۷ انواع دیگر فرآیند لایه‌گذاری پیش‌آغشته ۲۰۲

۸ فرآیند قالبگیری فشاری

۸–۱ مقدمه ۲۰۵
۸–۲ کاربردهای فرآیند قالبگیری فشاری ۲۰۷
۸–۳ مواد فرآیند قالبگیری فشاری ۲۰۸
۸–٤ روش فرآیند قالبگیری فشاری ۲۳۲
۸–۵ دستگاه فرآیند قالبگیری فشاری ۲٤۰
۸–٦ عوامل طراحی در فرآیند قالبگیری فشاری ۲٤٦
۸–۷ انواع دیگر فرآیند قالبگیری فشاری ۲٦۵

۹ فرآیند قالبگیری انتقال رزین

۹–۱ مقدمه ۲۷۰
۹–۲ کاربردهای فرآیند قالبگیری انتقال رزین ۲۷۳
۹–۳ مواد فرآیند قالبگیری انتقال رزین ۲۷٤
۹–٤ روش فرآیند قالبگیری انتقال رزین ۲۷۸
۹–۵ دستگاه فرآیند قالبگیری انتقال رزین ۲۸۳
۹–٦ عوامل طراحی در فرآیند قالبگیری انتقال رزین ۲۹٤
۹–۷ انواع دیگر فرآیند قالبگیری انتقال رزین ۳۰۷

۱۰ فرآیند قالبگیری تزریق واکنشی

۱۰–۱ مقدمه ۳۱۳
۱۰–۲ کاربردهای فرآیند قالبگیری تزریق واکنشی ۳۱٦
۱۰–۳ مواد فرآیند قالبگیری تزریق واکنشی ۳۱٦
۱۰–٤ روش فرآیند قالبگیری تزریق واکنشی ۳۲۱
۱۰–۵ دستگاه فرآیند قالبگیری تزریق واکنشی ۳۲۵
۱۰–٦ عوامل طراحی در فرآیند قالبگیری تزریق واکنشی ۳۳۱

۱۱ فرآیند قالبگیری تزریقی

۱۱–۱ مقدمه ۳٤۰
۱۱–۲ کاربردهای فرآیند قالبگیری تزریقی ۳٤٤
۱۱–۳ مواد فرآیند قالبگیری تزریقی ۳٤٤
۱۱–٤ روش فرآیند قالبگیری تزریقی ۳٤۷
۱۱–۵ دستگاه فرآیند قالبگیری تزریقی ۳۵۳
۱۱–٦ عوامل طراحی در فرآیند قالبگیری تزریقی ۳۵۹
۱۱–۷ انواع دیگر فرآیند قالبگیری تزریقی ۳٦۷

۱۲ فرآیند پالتروژن

۱۲–۱ مقدمه ۳٦۹
۱۲–۲ کاربردهای فرآیند پالتروژن ۳۷۲
۱۲–۳ مواد فرآیند پالتروژن ۳۷۳
۱۲–٤ روش فرآیند پالتروژن ۳۷۸
۱۲–۵ دستگاه فرآیند پالتروژن ۳۸٤
۱۲–٦ مدل سه‌منطقه‌ای در قالب فرآیند پالتروژن ۳۹۷
۱۲–۷ عوامل طراحی در فرآیند پالتروژن ۳۹۸
۱۲–۸ انواع دیگر فرآیند پالتروژن ٤۲٤

۱۳ فرآیند رشته‌پیچی

۱۳–۱ مقدمه ٤۳۲
۱۳–۲ کاربردهای فرآیند رشته‌پیچی ٤۳٤
۱۳–۳ مواد فرآیند رشته‌پیچی ٤۳۵
۱۳–٤ روش فرآیند رشته‌پیچی ٤۳۷
۱۳–۵ الگوهای رشته‌پیچی ٤٤۲
۱۳–٦ دستگاه فرآیند رشته‌پیچی ٤۵۰
۱۳–۷ عوامل طراحی در فرآیند رشته‌پیچی ٤٦۵
۱۳–۸ روابط طراحی مخازن تحت فشار ٤۸۹
۱۳–۹ انواع دیگر فرآیند رشته‌پیچی ۵۱۱

واژه‌نامه ۵۲۵

واژه‌یاب ۵۵٦

مراجع ۵۷۲

دیباچه

امروزه محصولات متنوعی ازکامپوزیت‌های پلیمری تولید و مورد استفاده قرارمیگیرد. جایگزینی این مواد به جای فلزات و سرامیک‌ها، به دلیل برتری ترکیب از ویژگی‌های آنها بوده لذا گسترش این علم نوین در محیط های علمی و دانشگاهی کشور های پیشرو با سرعت بالایی پیگیری میشود .از آن حیث که دسترسی به متون علمی و تخصصی لاتین در مورد کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت برای همگان بویژه علاقمندان به این دانش در کشور عزیزمان به راحتی میسور نمی باشد ، خلا وجود یک کتاب جامع فارسی نگارندگان را بر این داشت که با اهتمام بیشتری در راه تالیف کتاب جامع تکنولوژی کامپوزیت ها گام بردارند. از این‌رو هدف از تالیف این کتاب، بیان فرآیندهای مختلف و متداول ساخت قطعه‌های کامپوزیتی گرماسخت بوده و سعی بر آن بوده است تا جزئیات مراحل هر فرآیند به زبان علمی و عملیاتی بیان گردد. برای توصیف دقیق‌تر این فرآیندها، تلاش شده است تا پارامترها و معادلات حاکم بر آنها به صورت رابطه‌های ریاضی قابل کاربرد در طراحی یا تنظیم شرایط فرآیندی بیان شوند.

همان‌طور که از نام این کتاب برمی‌آید، مباحث در دو بخش کلی شامل مبانی و سپس فرآیندهای ساخت مطرح گردیده. بخش اول شامل ٤ فصل بوده و به برخی از مبانی کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت شامل پخت، رئولوژی، نفوذپذیری، پدیده تشکیل و رشد حباب و در پایان معادلات حاکم بر فرآیند پخت این کامپوزیت‌ها می‌پردازد. در بخش دوم نیز انواع فرآیندهای ساخت کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت در قالب ۹ فصل طبقه‌بندی گردیده است که در مجموع مشتمل بر ده‌ها فرآیند مختلف می‌باشد. سعی بر آن بوده تا این فصول از یک قالب کلی برخوردار باشند تا امکان مقایسه بین فرآیندهای مختلف وجود داشته باشد. هر فصل دارای یک مقدمه شامل یک توضیح کلی، برتری‌ها و کاستی‌های فرآیند است و در ادامه، کاربردها و ویژگی‌های مورد انتظار از مواد مورد استفاده در هر فرآیند توضیح داده شده است. سپس جزئیات مراحل و دستگاه‌های مورد استفاده در فرآیند بیان گردیده است . عوامل تاثیرگذار بر طراحی و محاسبات نیز به صورت یک زیربخش جداگانه گنجانده شده. در پایان هر فصل، گونه‌های زیرمجموعه فرآیند مورد بحث نیز توضیح داده شده است.

امید است که مطالب مطرح‌شده در این کتاب برای خوانندگان آن سودمند واقع شود. بی‌شک این کتاب نیز همانند بسیاری از کتاب‌هایی که در مرحله چاپ نخست هستند، خالی از اشکال نیست. از این‌رو مشتاقانه پذیرای انتقادها و پیشنهادهای شما خوانندگان عزیز هستیم.

در پایان از گروه صنعتی بهشت کویر آریانا تولیدکننده لوله و اتصالات کامپوزیت پیشرفته مورد استفاده در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی ، آب و فاضلاب و اولین تولید کننده لوله ومخازن GRE در کشور به دلیل در دسترس قراردادن امکانات و محیا نمودن شرایط جهت تست و آزمایش محصولات در آزمایشگاه مدرن شرکت و حمایت‌های مادی و معنوی ایشان در زمینه توسعه علم کامپوزیت و تلاش مدیران محترم آن جهت ارتباط صنعت و دانشگاه صمیمانه سپاسگزاری می‌نمائیم.

محمدرضا خسروشاهی

محمدجواد مقیسه

۱۱

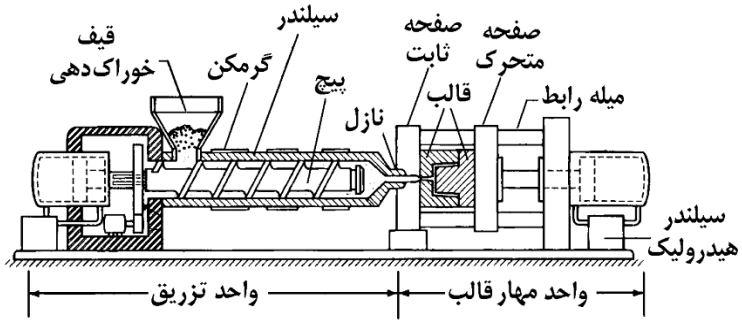
فرآیند قالبگیری تزریقی

۱۱-۱ مقدمه

فرآیند قالبگیری تزریقی[1] آمیزه‌های پلیمری تقویت‌شده و پرشده، گونه دیگری از قالبگیری به حالت مایع و یکی از متداول‌ترین روش‌های ساخت قطعه‌های کامپوزیتی سه‌بعدی بوده که کاربردهای بسیاری را برای شکل‌دهی به آمیزه‌های گرماسخت به خود اختصاص داده است. به جرات می‌توان گفت امروزه سرعت گسترش استفاده از این فرآیند بیش از سایر روش‌های ساخت کامپوزیت‌های گرماسخت است. این فرآیند بیشترین سرعت تولید را در میان همه روش‌های تولید پلاستیک‌های تقویت‌شده دارد به طوری که با به کارگیری این روش، امکان تولید بیش از یک میلیون قطعه در سال نیز وجود دارد. اگرچه این فرآیند در اصل برای شکل‌دهی رزین‌های گرمانرم طراحی شده بود، اما بعدها با اعمال تغییرات مناسب، امکان به کارگیری آن برای قالبگیری آمیزه رزین‌های گرماسخت سنتی و حتی آمیزه قالبگیری خمیری نیز به وجود آمد. به عبارت دیگر اصول کلی و دستگاه به کار رفته برای قالبگیری تزریقی رزین‌های گرمانرم و گرماسخت یکسان بوده و تفاوت بین فرآیند این دو نوع رزین به شرایط فرآیندی ویژه هر کدام از آنها مرتبط است.

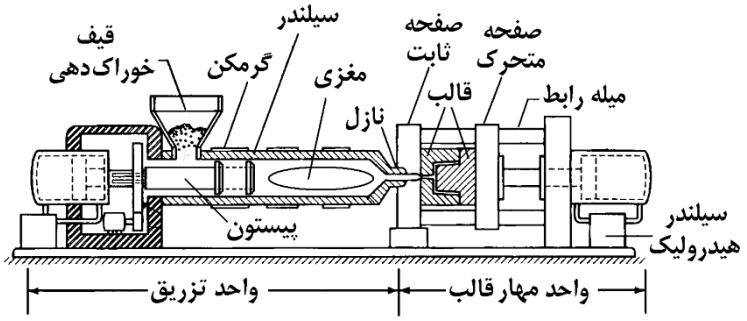
1- Injection Molding (IM)

شکل ۱۱-۱ نمونه‌ای از یک دستگاه قالبگیری تزریقی متداول را نشان می‌دهد. در فرآیند تزریق آمیزه گرمانرم، مواد از طریق یک قیف به درون سیلندر دستگاه وارد می‌شود. آمیزه در اثر گرمای بدنه سیلندر، نرم یا ذوب شده و سپس به درون یک قالب داغ تزریق می‌شود. در ابتدا برای تزریق از دستگاه‌های ساده مجهز به پیستون کوبه‌ای[1] استفاده می‌شد. همان‌طور که شکل ۱۱-۲ نشان می‌دهد، در این روش مواد به سادگی و با جابه‌جایی پیستون به درون قالب تزریق می‌شدند. اما با ادامه پیشرفت‌ها، دستگاه‌هایی ارائه شدند که اساس کار آنها بر پیچ رفت و برگشتی استوار بود. در روش دوم، مواد در اثر چرخش پیچ در طول یک سیلندر به پیش رفته و در همان زمان به دلیل تنش برشی اعمال‌شده به آن، نرم شده و به خوبی آمیخته می‌شود. آمیزه به محفظه بسته موجود در جلوی پیچ منتقل می‌شود. با افزایش مقدار آمیزه و در نتیجه افزایش فشار در این قسمت، پیچ به تدریج به عقب رانده می‌شود تا اینکه مقدار کافی از آمیزه برای تزریق جمع شود. زمانی که چرخش پیچ متوقف شد، پیچ به وسیله یک بازوی هیدرولیک به جلو حرکت کرده و در همان زمان شیر تخلیه باز شده و در نهایت مواد تجمع‌کرده در جلوی پیچ تحت فشار بسیار زیاد به درون محفظه یک قالب تزریق می‌شود. آمیزه ابتدا از یک تک‌سوراخ که گلوگاه[2] نامیده می‌شود، عبور کرده و سپس با جریان از درون چندین راهگاه[3] متصل به گلوگاه و در آخر درگاه[4] ورودی محفظه‌های قالب، به درون محفظه‌ها جریان می‌یابد. نیمه‌های قالب به وسیله یک سامانه هیدرولیک بسته نگهداشته می‌شود. رزین در قالب جامد شده و پس از سرمایش کافی، قالب باز شده و قطعه از آن خارج می‌گردد. چرخه قالبگیری برای قطعه‌های کوچک تا بزرگ ممکن است از چند ثانیه تا چند دقیقه باشد.



شکل ۱۱-۱- دستگاه قالبگیری تزریقی مجهز به پیچ رفت و برگشتی

1- Ram type plunger
2- Sprue
3- Runner
4- Gate



شکل ۱۱-۲- دستگاه قالبگیری تزریقی مجهز به پیستون کوبه‌ای

در ابتدا تصور می‌شد که پخت رزین‌های گرماسخت و چسبیدن آنها به سیلندر و پیچ، مانعی برای استفاده از آنها در این دستگاه‌ها است. به همین دلیل تلاش‌های بسیاری برای رفع موانع استفاده از این‌روش تولید انجام شد. سرانجام آمیزه‌های گرماسخت برای اولین بار در دهه ۱۹٤۰ در دستگاه‌های مجهز به پیستون در قالبگیری تزریقی استفاده شدند. یک دهه بعد، دستگاه قالبگیری تزریقی مجهز به پیچ رفت و برگشتی ارائه شد. البته طبیعت واکنش‌پذیر رزین‌های گرماسخت باعث دشواری در تزریق آنها با این نوع دستگاه می‌گردد. اگرچه اصول کلی فرآیند قالبگیری تزریقی برای آمیزه‌های گرمانرم و گرماسخت مشابه است، اما به دلیل متفاوت بودن طبیعت این دو دسته آمیزه، شرایط فرآیندی و بخش‌های مختلف دستگاه برای آنها تفاوت‌های زیادی دارد به طوری که به ندرت می‌توان از شرایط فرآیندی و دستگاه طراحی‌شده برای یک نوع ماده، برای سایر مواد استفاده کرد. شکل آمیزه‌های گرماسخت ممکن است به صورت پودری، پولکی یا خمیری باشد. این مواد نیز مشابه با آمیزه‌های گرمانرم باید پیش از تزریق نرم شوند. اما این نرم‌شدگی باید بدون پخت زودرس یا حتی پیشرفت قابل توجهی در واکنش پخت انجام گردد. بدیهی است با ژل‌شدن رزین، ادامه فرآیند ممکن نیست. از طرفی، افزایش قابل توجه درجه پخت ممکن است منجر به افزایش بیش از حد ویسکوزیته شود. برای جلوگیری از ژل‌شدن زودرس رزین در سیلندر، کنترل دقیق دما و زمان اقامت آمیزه‌های گرماسخت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل برخلاف آمیزه‌های گرمانرم، در این نوع آمیزه، دمای فرآیند پیش از تزریق باید به اندازه کافی کم باشد. به بیان دیگر آمیزه باید در دمایی کمتر از دمای پخت سریع، به اندازه کافی نرم شود و از طرفی پخت رزین نباید در زمان اقامت واقعی آن در داخل سیلندر دستگاه تزریق رخ دهد. به این منظور ضمن کاهش دمای سیلندر و پیچ (یا پیستون) معمولاً از پیچ کوچکتر با نسبت فشردگی[1]

1- Compression ratio

کمتری استفاده می‌شود. تغییر طراحی پیچ باعث می‌شود تا آمیزه گرماسخت برای بازه زمانی کوتاه‌تری تحت تنش برشی کوچکتری قرار گیرد. به این ترتیب از افزایش بیش از حد دما (ناشی از تبدیل کار مکانیکی به گرما) و خردشدن الیاف جلوگیری می‌شود. آمیزه باید در زمان جریان به درون محفظه قالب، یکپارچگی خود را حفظ کند. تفاوت دیگر این دو نوع آمیزه به چگونگی جامد شدن آنها برمی‌گردد. جامد شدن در آمیزه‌های گرمانرم در اثر سرمایش در قالب و در آمیزه‌های گرماسخت در اثر پخت در قالب انجام می‌شود که خود نیاز به گرمایش دارد. به بیان دیگر، آمیزه گرماسخت با فشار زیاد به درون محفظه یک قالب داغ رانده شده و به سرعت آن را پر می‌کند. دمای زیاد قالب باعث می‌شود تا آمیزه گرماسخت در زمان کوتاهی تحت فشار و گرما پخت شود. مطلوب‌ترین حالت آن است که قطعه به سرعت پخت شده و از قالب خارج گردد تا حداکثر سرعت تولید قابل دستیابی باشد. لازم به ذکر است که در قالبگیری تزریقی آمیزه‌های گرماسخت برخلاف آمیزه‌های گرمانرم، زمان چرخه قالبگیری به سرعت سرمایش قطعه در قالب بستگی ندارد بلکه سرعت پخت کنترل‌کننده آن است.

با وجود دشواری تزریق آمیزه‌های دارای ویسکوزیته زیاد، می‌توان از این فرآیند برای تولید انبوه قطعه‌های بسیار پیچیده (دارای سوراخ، دندانه و نافی) استفاده کرد. به همین دلیل این روش برای تولید قطعه‌های خودرو و قطعه‌های مصرفی مناسب است. با به کارگیری قالب چندمحفظه‌ای، سرعت تولید باز هم افزایش خواهد یافت. جدول ۱۱-۱ برتری‌ها و کاستی‌های فرآیند قالبگیری تزریقی را نسبت به سایر روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۱۱-۱- برتری‌ها و کاستی‌های فرآیند قالبگیری تزریقی

برتری‌ها	کاستی‌ها
چرخه قالبگیری بسیار کوتاه	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا
تولید قطعه‌های کوچک، بزرگ و پیچیده	مقاومت مکانیکی نسبتاً کم
رواداری ابعادی دقیق (تا ۵۰ میکرون)	نامناسب برای تولید کم
تلفات کم مواد	نامناسب برای تولید نمونه‌های آزمایشی
امکان تولید انبوه (هزینه تمام‌شده کم)	قالب‌های گران
پرداخت بسیار خوب در تمام سطح‌ها	
امکان استفاده از مغزی، نافی، شیار در قطعه	
بهترین تکرارپذیری ویژگی‌ها	
امکان خودکارسازی کامل فرآیند	

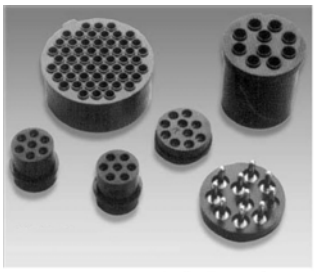
۱۱-۲ کاربردهای فرآیند قالبگیری تزریقی

همان‌طور که پیشتر بدان اشاره شد، به دلیل سرعت زیاد تولید و هزینه تمام‌شده کم قطعه در قالبگیری تزریقی، این روش برای کاربردهای تولید انبوه از جمله قطعه‌های خودرو، لوازم خانگی، الکتریکی و ورزشی مناسب است. برخی از قطعه‌های ساخته‌شده با این روش عبارتند از بدنه خردکن سینک آشپزخانه، قطعه‌های چرخ خیاطی، بدنه موتور وسایل کوچک، بدنه فیوز الکتریکی، غلاف ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا. شکل ۱۱-۳ برخی از قطعه‌های ساخته‌شده با این روش را نشان می‌دهد.

۱۱-۳ مواد فرآیند قالبگیری تزریقی

در فرآیند قالبگیری تزریقی می‌توان از آمیزه‌های CMC، BMC، SMC یا TMC استفاده کرد. آمیزه CMC به شکل جامد پودری، دانه‌ای یا پولکی و آمیزه‌های BMC، SMC و TMC به شکل جامد خمیری هستند. این آمیزه‌ها شامل رزین، آغازگر، الیاف، پرکننده و گاهی رنگدانه و افزودنی‌های کمک‌فرآیند هستند. بسته به الزمات هر کاربرد می‌توان مناسب‌ترین آمیزه را انتخاب کرد. در ادامه، اجزای انواع آمیزه‌ها بررسی می‌شود. روش تولید این آمیزه‌ها در بخش فرآیند قالبگیری فشاری ارائه شده است.

غلاف ترانسفورماتور



عایق رابط‌های چندسوزنه

قطعات موتورهای کوچک

شکل ۱۱-۳- قطعه‌های ساخته‌شده با قالبگیری تزریقی برای عابق الکتریکی و موتورهای کوچک

۱-۳-۱۱ آمیزه قالبگیری سنتی

۱-۱-۳-۱۱ رزین

اغلب رزین‌ها دارای گونه‌های ویژه‌ای برای تولید آمیزه‌های CMC برای این فرآیند هستند. این رزین‌ها شامل آلیل‌استر (دی‌آلیل‌ارتوفتالات و دی‌آلیل‌ایزوفتالات)، آمین (اوره–فرمالدهید، ملامین–فرمالدهید)، آلکید، اپوکسی، فنولیک، پلی‌ایمید گرماسخت و سیلیکون هستند. این رزین‌ها معمولاً با جریان‌پذیرترین گونه‌های رزین‌های فرآیندهای قالبگیری فشاری و قالبگیری انتقال رزین مشابه هستند. رزین باید در دمای کمی نرم شده و به مایعی با ویسکوزیته کم تبدیل شود. بنابراین استفاده از رزین‌های پیشرفته دارای محدودیت‌هایی است. از طرفی، رزین باید در زمان جابه‌جایی در سیلندر و عملیات تزریق، بدون پخت زیاد و ژل‌شدن، ویسکوزیته کم خود را حفظ کرده و پس از تزریق به داخل قالب داغ به سرعت پخت شود. عامل دیگر در انتخاب رزین، به حداقل رسیدن مقدار مواد فرار آزادشده در پخت است.

۲-۱-۳-۱۱ تقویت‌کننده

همه انواع تقویت‌کننده شامل الیاف شیشه، آرامید و کربن و حتی سلولز، سرامیک، فلزی و پلاستیک‌های گرمانرم قابل استفاده هستند، الیاف شیشه نوع E بیشترین کاربرد را در قالبگیری تزریقی دارد. ترکیب الیاف آرامید و کربن به همراه رزین‌های اپوکسی، پلی‌ایمید، فنولیک و پلی‌استر به کار می‌رود. الیاف سلولزی به همراه رزین‌های اوره، ملامین، پلی‌استر و فنولیک استفاده می‌شوند. الیاف کربن پوشش‌داده‌شده با فلز و الیاف فلزی چون آلومینیوم، نیکل و فولاد ضدزنگ علاوه بر تقویت آمیزه و افزایش رسانایی الکتریکی، به حفاظت قطعه در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی[1] و رادیویی[2] و تخلیه بارهای ساکن[3] کمک می‌کند. الیاف گرمانرم نظیر پلی‌استر و نایلون نیز علاوه بر تقویت مکانیکی، به افزایش مقاومت خستگی، ضربه و بهبود شکنندگی کامپوزیت کمک می‌کند. معمولاً بین ۳۰ تا ٤٠ درصد حجمی الیاف آسیاب‌شده و یا خردشده با طول بین ۰/۷۵ تا ۳ میلی‌متر استفاده می‌شود. برای ساخت قطعه‌های باربرداری به مقدار زیادی تقویت‌کننده نیاز است. البته حتی در صورت استفاده از الیاف بلند، علاوه بر شکست آن در مرحله نرم‌شدگی، افزایش شدید ویسکوزیته و دشواری در فرآیندپذیری آمیزه و جهتگیری در جهت جریان اجتناب‌ناپذیر است.

1- Electromagnetic Interference (EMI)
2- Radiofrequency Interference (RFI)
3- Electrostatic Discharge (ESD)

۱۱-۳-۱-۳ پرکننده

معمولاً آمیزه CMC دارای مقدار زیادی پرکننده ذره‌ای شامل دانه‌های شیشه‌ای، پرکننده‌ها معدنی، آلی و پودر فلزات هستند. هر چه شکل پرکننده به کره نزدیکتر باشد، ویسکوزیته آمیزه به مقدار کمتری افزایش می‌یابد. اگرچه با کاهش مقدار پرکننده، ویسکوزیته آمیزه کاهش و جریان‌پذیری آن بهبود می‌یابد، اما از طرف دیگر، اثرات منفی واکنش پخت رزین یعنی آزادشدن مواد و جمع‌شدگی افزایش می‌یابد. بنابراین باید بین جریان‌پذیری رزین، مقدار مواد فرار و جمع‌شدگی یک توازن مناسب برقرار گردد. به همین دلیل معمولاً مقدار پرکننده کمتر از ۵ درصد حجمی آمیزه نیست.

دانه‌های شیشه‌ای کروی به خوبی در رزین پراکنده شده و به توزیع یکنواخت‌تر تنش در قطعه کمک می‌کنند. آمیزه‌های پرشده با این نوع پرکننده دارای مقاومت سایشی و شیمیایی بالایی بوده و در مقایسه با سایر پرکننده‌ها منجر به افزایش کمتر ویسکوزیته، کاهش بیشتر جمع‌شدگی، تاب‌خوردگی و زمان قالبگیری می‌شوند. کره‌های توپر منجر به افزایش مدول و کره‌های توخالی بدون کاهش قابل توجه در مقاومت مکانیکی، باعث کاهش قیمت و وزن قطعه می‌شوند. پرکننده‌های معدنی در مقایسه با دانه‌های شیشه‌ای، فرآیندپذیری ضعیف‌تری داشته و معمولاً ویسکوزیته را به مقدار بیشتری افزایش می‌دهند. پرکننده‌هایی نظیر خاک رس، میکا، تالک و ولستونیت[1]، علاوه بر کاهش قیمت، ضریب انبساط گرمایی و جمع‌شدگی، به دلیل داشتن نسبت طول به قطر بالاتر از دانه‌های شیشه‌ای کروی، به تقویت مکانیکی قطعه نیز کمک می‌کنند. تری‌هیدرات آلومینا برای افزایش مقاومت رزین‌های پلی‌استر، اپوکسی و فنولیک در برابر آتش به کار می‌رود. کربنات کلسیم که معمولاً به رزین پلی‌استر اضافه می‌شود، برای کاهش قیمت، افزایش پایداری ابعادی در زمان پخت و ایجاد پرداخت بهتر سطح استفاده می‌شوند. پودر فلزاتی چون آلومینیوم (به شکل پولکی یا شیشه پوشش داده‌شده با آلومینیوم)، برنز، روی و نیکل در اصل برای افزایش رسانایی گرمایی و الکتریکی و همچنین محافظت در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی یا رادیویی استفاده می‌شوند. پرکننده‌های آلی نظیر پودر چوب، نشاسته و انواع کربوهیدرات‌ها به عنوان پرکننده برای کاهش قیمت و حتی تقویت‌کننده برای رزین‌های اوره، ملامین و فنولیک استفاده می‌شود. کاستی بزرگ این پرکننده‌ها، جذب آب آنهاست.

1- Wollastonite

۱۱-۳-۲ آمیزه قالبگیری خمیری

آمیزه BMC به طور گسترده‌ای در این فرآیند استفاده می‌شود. به دلیل نیاز به جریان‌پذیری مناسب آمیزه در زمان عملیات نرم‌سازی و تزریق، معمولاً طول الیاف آمیزه BMC مورد استفاده در قالبگیری تزریقی بین ۱ تا ۵ میلی‌متر است. اجزا و روش ساخت این نوع آمیزه نیز در بخش قالبگیری فشاری بیان شده است.

۱۱-۳-۳ آمیزه قالبگیری ورقه‌ای

در قالبگیری تزریقی می‌توان از آمیزه‌های SMC و TMC استفاده نمود. البته به دلیل ویسکوزیته آمیزه به طول الیاف، تنها آمیزه‌هایی دارای الیاف با طول کم برای تزریق مناسبند. بنابراین آمیزه‌های دارای الیاف پیوسته کاربردی در این فرآیند ندارند. ویژگی‌های این آمیزه‌ها در بخش قالبگیری فشاری بیان شده است.

۱۱-٤ روش فرآیند قالبگیری تزریقی

اگرچه اصول کلی قالبگیری تزریقی آمیزه‌های CMC و BMC یکسان است، اما تفاوت نوع رزین و طول الیاف در این آمیزه‌ها منجر به ایجاد تفاوت‌هایی در فرآیند آنها نیز می‌گردد. به عنوان نمونه برای تزریق آمیزه BMC باید از دستگاه‌های قالبگیری بزرگتر، فشار قالبگیری کمتر و دستگاه خوراک‌دهی ویژه‌ای استفاده شود. در این فشارهای کمتر، امکان قالبگیری قطعه‌های بزرگتر نیز فراهم می‌گردد؛ در حالی که قالبگیری تزریقی آمیزه CMC به قطعه‌هایی با وزن حداکثر ۵ کیلوگرم محدود می‌شود. فرآیند تزریق با استفاده از پیستون و در بیشتر موارد به کمک پیچ تزریق انجام می‌گردد. چون کلیات فرآیند برای هر دو نوع دستگاه یکسان است، از این‌رو، مراحل فرآیند قالبگیری تزریقی برای دستگاه مجهز به پیچ تزریق ارائه شده و در پایان، تفاوت‌های فرآیند تزریق در دستگاه تزریق پیستون کوبه‌ای بیان می‌شود. شکل ۱۱-٤ طرحواره‌ای از دستگاه قالبگیری تزریقی مناسب برای آمیزه‌های گرماسخت و شکل ۱۱-۵ مراحل مختلف چرخه قالبگیری تزریقی با استفاده از این دستگاه را نشان می‌دهد.

۱۱-٤-۱- پیش‌گرمایش- معمولاً آمیزه پیش از خوراک‌دهی گرم می‌شود تا رطوبت جذب‌شده خارج گردد. این کار عموماً بر روی آمیزه‌های CMC انجام می‌شود.

۱۱-٤-۲- خوراک‌دهی- آمیزه در بخش خوراک‌دهی که به شکل یک قیف است، قرار داده می‌شود. شکل پولکی یا دانه‌ای آمیزه CMC باعث می‌شود که با آسانی در اثر جاذبه به درون سیلندر دستگاه منتقل گردد. اغلب برای جلوگیری از تشکیل کلوخه و بسته‌شدن خروجی

قیف، آمیزه هم زده شده و همچنین دمای قیف در حد دمای محیط تنظیم می‌شود. اما چون امکان خوراک‌دهی خودبه‌خودی آمیزه خمیری BMC وجود ندارد، بنابراین عملیات خوراک‌دهی باید با فشار انجام شود. این کار عموماً با نصب یک پیچ بزرگ مخروطی‌شکل در بدنه قیف صورت می‌گیرد. با چرخش پیچ خوراک‌دهی، آمیزه خمیری از بالای آن برداشته شده و پس از گذر از مسیر باریک‌شونده قیف به پیچ دستگاه تزریق می‌رسد. در برخی از دستگاه‌ها به جای پیچ خوراک‌دهی، یک پیستون ساده برای راندن آمیزه به درون سیلندر به کار می‌رود.

۱۱-٤-۳- تنظیم پارامترهای فرآیندی- در مرحله بعد، پارامترهای فرآیندی از جمله دما و فشار بخش‌های مختلف دستگاه در کامپیوتر تنظیم می‌شود. جدول ۱۱-۲ نمونه‌ای از پارامترهای فرآیندی را نشان می‌دهد. دستگاه روشن شده و تا افزایش دمای بخش‌های مختلف آن به دمای مطلوب فرآیندی کار می‌کند.

۱۱-٤-٤- نرم‌سازی[1] و جابه‌جایی- برای انجام عملیات تزریق لازم است که آمیزه نخست به روش مناسبی به قالب منتقل شده و در ضمن تا پیش از رسیدن به نازل تزریق، از ویسکوزیته کمی برخوردار باشد تا جریان آن در داخل قالب به راحتی انجام شود. به این منظور، آمیزه پس از انتقال از قیف خوراک‌دهی به درون سیلندر، در اثر برخورد با پره‌های پیچ چرخان در طول سیلندر به پیش می‌رود. در منطقه اول پیچ، آمیزه فشرده شده و هوا به عقب برگشته و از طریق قیف خارج می‌شود. آمیزه فشرده‌شده، با حرکت در طول پیچ نرم می‌شود. عملیات نرم‌سازی در اثر انتقال گرما از سیلندر به آمیزه و همچنین تبدیل کار مکانیکی انجام‌شده بر روی آمیزه (ناشی از چرخش پیچ) به گرما صورت می‌پذیرد. چرخش پیچ، خود به انتقال گرمای بهتر از بدنه سیلندر به آمیزه و همچنین همگن‌شدن آن کمک می‌کند. دمای سیلندر به وسیله جریان آب یا روغن در یک غلاف نصب‌شده در محیط تنظیم می‌شود. یکی از تفاوت‌های مهم قالبگیری تزریقی آمیزه‌های گرماسخت با گرمانرم به دمای سیلندر برمی‌گردد. برای جلوگیری از پخت زودرس آمیزه‌های گرماسخت، باید از افزایش بیش از حد دما جلوگیری شود. به همین دلیل دمای استوانه به دقت کنترل می‌شود؛ چرا که اختلاف دمای بین شرایط ویسکوزیته کم و دمای پخت، حدود ۱۰ درجه سلسیوس است. به همین دلیل دمای انتهای سیلندر برای نرم‌سازی بیشتر آمیزه‌ها، حداکثر به ۹۰ درجه سلسیوس می‌رسد. آمیزه‌های CMC که در دمای اتاق به شکل جامد هستند، مرحله نرم‌شدگی مشابه با فرآیند رزین‌های گرمانرم است. به عبارت دیگر این آمیزه‌ها باید نخست ذوب شوند تا در مرحله بعد به صورت یک مایع روان جریان یابند. اما چون آمیزه BMC در دمای محیط به شکل یک خمیر غلیظ اما روان است،

1- Mastication

بنابراین نیازی به ذوب ندارد. به همین دلیل برای تزریق آمیزه CMC، دمای سیلندر معمولاً بین ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس تنظیم می‌شود. اما برای تزریق آمیزه BMC می‌توان از سیلندری با دمای کمتر یعنی بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس یا حتی سیلندر کاملاً سرد استفاده کرد. اما در شرایط واقعی، برای کاهش ویسکوزیته و همچنین کاهش زمان پخت قطعه در قالب، دمای استوانه نزدیک به دمای پخت رزین نگه داشته می‌شود. چرخش پیچ تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار کافی از آمیزه نرم در جلوی آن جمع شود.

۱۱-٤-۵- فشرده‌سازی- به دلیل ساز و کار و طراحی ویژه پیچ، آمیزه با حرکت به سمت نازل به تدریج فشرده می‌شود. در طول مدتی که پیچ در حال چرخش است، شیر تخلیه انتهای سیلندر بسته نگه داشته می‌شود. با گذشت زمان، آمیزه نرم‌شده بیشتری در جلوی پیچ جمع شده و در نتیجه، فشار واردشده به شیر تخلیه به تدریج افزایش می‌یابد. سرانجام این افزایش فشار سبب به عقب رانده شدن پیچ در برابر فشار اعمال‌شده توسط بازوی هیدرولیک متصل‌شده به آن می‌شود. فشار لازم برای شروع حرکت پیچ به عقب، پس‌فشار[1] یا فشار پشت پیچ نامیده می‌شود که خود معیاری از کار انجام‌شده بر روی آمیزه است. فشار پشت پیچ معمولاً بین ۷ تا ١٤ بار تنظیم می‌شود. برای تنظیم مقدار آمیزه مورد نیاز برای تزریق در مرحله بعدی، مقدار بازگشت پیچ کنترل می‌شود. در این وضعیت قالب همچنان باز است و واحد تزریق با قالب فاصله دارد تا از انتقال گرما از نازل داغ به گلوگاه جلوگیری شود.

جدول ۱۱-۲- نمونه‌ای از پارامترهای فرآیندی قالبگیری تزریقی

پارامتر فرآیندی	مقدار	واحد
دمای سیلندر	۵۰	(˚C)
دمای قالب	۱۵۵	(˚C)
مقدار تزریق	۲۳۰	(g)
فشار تزریق	۷۰۰	(bar)
فشار ماند	۳۵۰	(bar)
زمان تزریق	۳	(s)
زمان قالبگیری	۲۵	(s)
نیروی بست‌ها	۵	(ton)

1- Back pressure

۱۱-٤-٦- بستن قالب- پس از آن که مقدار کافی از آمیزه (برای انجام تزریق) در جلوی پیچ جمع شد، نیمه‌های قالب با استفاده از فشار روغن بسته شده و محکم به یکدیگر فشرده می‌شوند تا در برابر فشار تزریق جابه‌جا نشوند.

۱۱-٤-۷- تزریق- در مرحله بعد، چرخش پیچ متوقف شده و سپس حامل سیلندر[1] به جلو می‌رود به گونه‌ای که نازل در تماس با گلوگاه قالب قرار گیرد. شیر تخلیه نازل باز شده و در اثر فشار بازوی هیدرولیک اصلی، پیچ را همانند یک پیستون تحت سرعت کنترل‌شده‌ای به جلو می‌راند. جابه‌جایی طولی پیچ باعث تزریق پرفشار مقدار مشخصی از آمیزه نرم‌شده از طریق نازل به درون یک قالب بسته می‌شود. در برخی موارد ممکن است چرخش پیچ پس از پر شدن قالب متوقف گردد. فشار تزریق آمیزه‌های CMC معمولاً بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ بار و برای آمیزه‌های BMC بین ۵۰ تا ۱۰۰ بار انتخاب می‌شود. فشار تزریق پلاستیک‌های گرمانرم بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ بار است. آمیزه از گلوگاه داخل قالب به درون مجموعه‌ای از راهگاه‌ها جریان یافته و در آخر با گذر از درگاه‌ها، به درون محفظه‌های قالب داغ وارد می‌شود. هوای موجود در قالب به وسیله جبهه جریان آمیزه از دریچه‌های تخلیه موجود بر روی خط جداکننده نیمه‌های قالب به بیرون رانده می‌شود. برای جلوگیری از برگشت آمیزه از قالب به درون سیلندر، نوک پیچ به یک شیر یکطرفه مجهز است. زمان تزریق ممکن است برای قطعه‌های کوچک تا بزرگ از چند ثانیه تا حدود ۱۰ ثانیه تغییر کند. دمای آمیزه موجود در قالب در اثر انتقال گرمای رسانشی ناشی از تماس با دیواره قالب داغ و همچنین تبدیل اتلاف ویسکوز ناشی از جریان سریع آن از مجراهای باریک درون قالب، در زمان کوتاهی به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. این افزایش دما به پخت سریع قطعه کمک می‌کند.

۱۱-٤-۸- حفظ فشار- پس از پرشدن قالب، پیچ به صورت ساکن باقی می‌ماند تا با حفظ فشار زیاد در داخل محفظه، از بازگشت آمیزه به بیرون از قالب و همچنین کاهش تغییرات ابعادی ناشی از پخت رزین جلوگیری و در ضمن از مطابقت ابعاد قطعه با محفظه قالب اطمینان حاصل شود. این فشار که فشار ماند[2] نامیده می‌شود، تا زمان شروع جامد شدن قطعه حفظ می‌شود. مقدار فشار ماند برای آمیزه‌های CMC بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ بار بوده و زمان اعمال آن به اندازه قطعه، نوع آمیزه و دمای آمیزه و قالب بستگی دارد. برای جبران جمع‌شدگی قطعه در اثر پخت، ممکن است مقدار بیشتری آمیزه تا پیش از نقطه ژل تزریق شود.

1- Cylinder carriage
2- Holding pressure

۱۱-٤-۹- پخت- پخت آمیزه تزریق‌شده به قالب تحت دما و فشار بالا انجام می‌شود. ایده‌آل‌ترین حالت آن است که فشار قالب در زمان ژل‌شدن رزین کاهش یابد. اما برای جلوگیری از تغییرشکل قطعه، آمیزه حتی تا پس از ژل‌شدن نیز تحت فشار بالایی نگه داشته می‌شود. پخت سریع آمیزه‌ها زمانی رخ می‌دهد که اختلاف دمای قابل توجهی بین مرحله نرم‌سازی در داخل سیلندر و مرحله پخت در داخل قالب وجود داشته باشد. در فرآیند قالبگیری تزریقی آمیزه‌های گرماسخت (برخلاف آمیزه‌های گرمانرم)، دمای قالب نسبت به دمای سیلندر تزریق بیشتر است؛ چرا که پلاستیک‌های گرمانرم در اثر سرمایش و رزین‌های گرماسخت در اثر گرمایش و کامل‌شدن واکنش پخت سخت می‌شوند. دمای قالب با چرخش پرسرعت یک سیال نظیر آب در مجراهای تعبیه‌شده در آن کنترل می‌گردد. دمای قالب برای آمیزه‌های CMC معمولاً بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس و برای آمیزه‌های BMC در بازه ۱۲۰ تا ۱۷۰ درجه سلسیوس قرار دارد. دمای راهگاه‌ها نیز برابر با دمای قالب تنظیم می‌شود تا مواد موجود در آنها نیز همزمان با قالب پخت شوند. با جامدشدن آمیزه در راهگاه‌ها و درگاه‌های محفظه‌های قالب، امکان برگشت آمیزه وجود ندارد. به همین دلیل در این مرحله فشار برداشته می‌شود. برای این کار، شیر تخلیه نازل بسته شده، پیچ تزریق به عقب برگشته و دوباره به چرخش درمی‌آید. حامل سیلندر نیز به عقب برگشته و نازل از قالب جدا می‌شود. از این مرحله به بعد، عملیات پخت بقیه قسمت‌های آمیزه تزریق‌شده به قالب با عملیات نرم‌سازی آمیزه مرحله بعدی همزمان است. زمان پخت کامل قطعه با توجه به طراحی و دمای قالب، نوع سامانه رزین و ضخامت قطعه بین چند ثانیه تا چند دقیقه تغییر می‌کند. به دلیل اندازه بزرگتر قطعه‌های ساخته‌شده از آمیزه BMC، زمان پخت معمولاً بین ۲ تا ۵ دقیقه است. راهکارهای افزایش سرعت پخت عبارتند از استفاده از آمیزه‌های ویژه با پخت سریع، افزایش دمای قالب و افزایش سرعت تزریق.

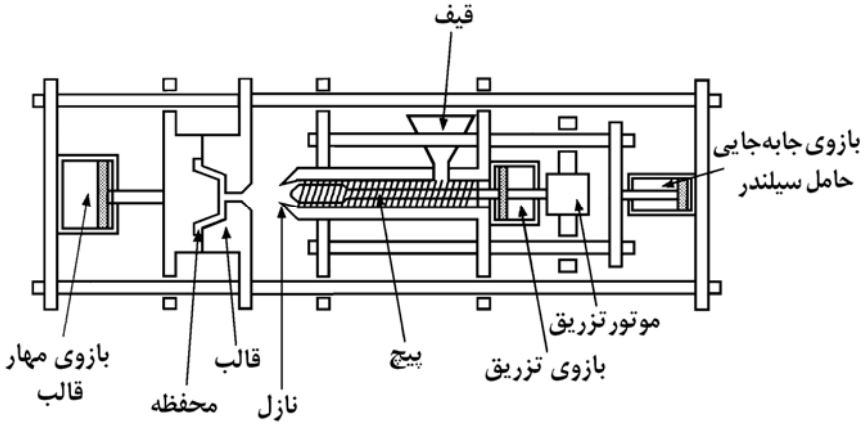
۱۱-٤-۱۰- گازگیری- یکی از موارد مهم در فرآیند قالبگیری تزریقی، خروج مواد فرار ناشی از پخت از قالب است. عملیات گازگیری به وسیله دریچه‌های تعبیه‌شده در داخل قالب، خط جدایش نیمه‌های قالب و میل‌پران انجام می‌شود. گاهی به دلیل حجم زیاد گاز آزادشده، وجود دریچه‌ها کافی نیست. در چنین مواردی نیمه‌های قالب در زمان پخت قطعه، یک یا دو بار به مدت ۱ تا ۲ ثانیه باز شده و سپس دوباره بسته می‌شود.

۱۱-٤-۱۱- خروج قطعه- قطعه تا زمانی در قالب باقی می‌ماند که مقاومت مکانیکی کافی در اثر افزایش درجه پخت ایجاد شود. به بیان دیگر باید امکان خروج قطعه از قالب بدون تغییرشکل در آن وجود داشته باشد. پس از تکمیل پخت قطعه، نیمه‌های قالب از یکدیگر جدا

شده و قطعه به همراه آمیزه سخت‌شده درون راهگاه‌ها و گلوگاه به وسیله میل‌پران از قالب جدا می‌شود. چون قطعه با دمای زیادی خارج می‌شود، پخت آن حتی در بیرون از قالب نیز ادامه یابد. خروج پیش از موعد قطعه از قالب سبب پخت غیریکنواخت آن خواهد شد.

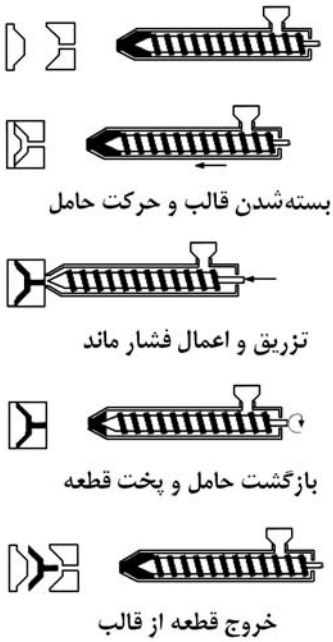
۱۱-٤-۱۲- تمیزکاری- پس از خروج قطعه از قالب، قسمت‌های اضافی آن شامل خط جدایش نیمه‌های قالب و آمیزه پخت‌شده در گلوگاه، راهگاه‌ها و درگاه‌های از آن جدا می‌شود.

در دستگاه تزریق مجهز به پیستون کوبه‌ای، پیستون فقط یک حرکت رفت و برگشتی دارد. به دلیل عدم وجود پیچ، خردشدگی الیاف کاهش می‌یابد. از این‌رو این نوع دستگاه در صورت نیاز مقاومت مکانیکی بالا در قطعه استفاده می‌شود. نرم‌سازی مواد در این دستگاه از طریق جریان فشاری آمیزه از فاصله بین بدنه سیلندر گرم و مغزی اژدری‌شکل[1] انجام می‌شود. با حرکت رو به جلوی پیستون کوبه‌ای، آمیزه جمع‌شده در انتهای سیلندر تزریق می‌گردد. در همان زمان، آمیزه تازه از میان سیلندر و مغزی رانده شده و برای تزریق بعدی آماده می‌شود. با برگشت پیستون کوبه‌ای به عقب (بخش خوراک‌دهی)، آمیزه تازه برداشته می‌شود. در هر لحظه، آمیزه موجود در داخل سیلندر به اندازه چندین عملیات تزریق است. زمان اقامت آمیزه در سیلندر به اندازه‌ای است که از نرم‌شدگی کافی آن اطمینان حاصل گردد. عملیات نرم‌شدگی در این دستگاه تنها در اثر انتقال گرما از بدنه دستگاه به آمیزه صورت می‌گیرد. البته در برخی دستگاه‌ها، امکان گرمایش مغزی هم وجود دارد. کاستی‌های این روش نسبت به سامانه مجهز به پیچ شامل آمیختگی بسیار ضعیف (و در نتیجه توزیع غیریکنواخت دمای آمیزه)، حذف یکی از منبع‌های گرمایش (و در نتیجه سرعت نرم‌شدگی کمتر) و فشردگی زیاد مواد است.



شکل ۱۱-٤- دستگاه قالبگیری تزریقی آمیزه‌های گرماسخت

1- Torpedo



شکل ۱۱-۵- مراحل قالبگیری تزریقی در دستگاه تزریق مجهز به پیچ رفت و برگشتی

۱۱-۵ دستگاه فرآیند قالبگیری تزریقی

شکل ۱۱-٤ بخش‌های اصلی دستگاه قالبگیری تزریقی را نشان می‌دهد. این دستگاه‌ها برحسب ظرفیت قالبگیری و تزریق (مقدار آمیزه تزریق‌شده در هر بار تزریق) تقسیم‌بندی می‌شوند. دستگاه‌های تزریق آمیزه‌های BMC در مقایسه با CMC بزرگتر بوده و برای ساخت قطعه‌های بزرگتر تحت فشار کم به کار می‌رود. این دستگاه‌ها از دو بخش اصلی شامل واحد تزریق و واحد مهار قالب تشکیل شده است. واحد تزریق شامل قیف، سیلندر، پیچ، نازل، بازوی هیدرولیک و سامانه گرمایش است. وظیفه این واحد، تبدیل آمیزه قالبگیری به ماده‌ای نرم و یکنواخت و تزریق آن به درون قالب است. اگرچه برای تزریق آمیزه هر دو سامانه پیستون و پیچی موجود هستند، اما دستگاه‌های تزریق بر پایه پیچ متداول‌ترند. واحد مهار قالب شامل نیمه‌های ثابت و متحرک قالب، میله‌های راهنمای قالب و دستگاهی برای باز و بسته‌کردن و اعمال فشار به قالب است. وظیفه این واحد، نگهداشتن، باز و بسته‌کردن قالب و خروج قطعه از قالب است.

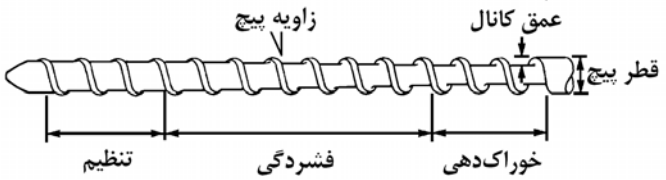
۱-۵-۱۱ بخش خوراک‌دهی

بخش خوراک‌دهی به شکل یک قیف است که خروجی آن به ابتدای سیلندر منتهی می‌شود. اگر امکان جابه‌جایی خودبه‌خودی آمیزه از بالا تا پایین وجود نداشته باشد، از دو روش ویژه استفاده می‌شود. در روش اول، یک پیچ بزرگ مخروطی به صورت عمودی در بدنه قیف قرار می‌گیرد. در روش دیگر، از یک پیستون ساده به جای پیچ خوراک‌دهی استفاده می‌شود.

۲-۵-۱۱ پیچ

جابه‌جا شدن و تزریق آمیزه به قالب به وسیله پیچ انجام می‌شود. معمولاً سرعت چرخش پیچ بین ۲۰ تا ۷۵ دور بر دقیقه است. همان‌طور که شکل ۱۱-٦ نشان می‌دهد، پیچ تزریق معمولاً شامل سه بخش خوراک‌دهی، فشردگی و تنظیم است. وظیفه بخش خوراک‌دهی، انتقال آمیزه به بخش گرم سیلندر می‌باشد. عمق کانال پیچ در این بخش ثابت است. برای جلوگیری از چرخش آمیزه به همراه پیچ، معمولاً شیارهایی در طول سیلندر در این بخش تراشیده می‌شود. وظیفه بخش فشردگی، ذوب یا نرم‌سازی آمیزه است. برای جبران تغییر چگالی آمیزه، عمق کانال پیچ در این بخش به تدریج کاهش می‌یابد. در بخش تنظیم نیز عمق کانال پیچ ثابت اما بسیار کمتر از بخش خوراک‌دهی است. وظیفه این بخش، نرم‌سازی و آمیختگی نهایی آمیزه می‌باشد. ظرفیت تزریق تابعی از قطر و جابه‌جایی پیچ در زمان تزریق است.

چون کار مکانیکی پیچ بر روی آمیزه منجر به افزایش دما و کاهش طول الیاف تقویت‌کننده آمیزه می‌شود، بنابراین طراحی پیچ باید به گونه‌ای باشد که عملیات نرم‌سازی آمیزه به حداقل برسد. از این‌رو در فرآیند قالبگیری تزریقی رزین‌های گرماسخت عموماً از پیچ‌های کوتاه با نسبت فشردگی کمتر از ۱/۵ استفاده می‌شود. در غیراینصورت امکان سخت‌شدن آمیزه در داخل دستگاه در اثر گرمای آزادشده وجود دارد. نوع آمیزه مصرفی تعیین‌کننده لزوم یا منع استفاده از چنین روشی برای افزایش دماست. اگر افزایش دما به این روش مطلوب نباشد، در طراحی پیچ و سیلندر باید از ایجاد تنش برشی زیاد در آمیزه اجتناب شود. با توجه به طول بیشتر الیاف در آمیزه BMC نسبت به CMC، باید از پیچی با قطر حداقل ۷۵ میلی‌متر استفاده شود تا از خردشدن شدید الیاف جلوگیری شود. این عامل تاثیر زیادی بر اندازه دستگاه دارد.



شکل ۱۱-٦- طراحی پیچ تزریق

۱۱-۵-۳ سامانه‌های گرمایش و سرمایش

اگرچه دمای آمیزه در اصل به وسیله واحد تزریق کنترل می‌شود، اما سرعت تزریق و همچنین مقدار فشار ماند نیز بر دمای آمیزه موثر است. در آمیزه‌های گرماسخت، برای جلوگیری از پخت زودرس آمیزه لازم است دمای سیلندر کمتر از فرآیند آمیزه‌های گرمانرم تنظیم شود. به این منظور باید به جای گرمکن‌های بر مبنای مقاومت الکتریکی که در قالبگیری تزریقی آمیزه‌های گرمانرم استفاده می‌شود، از سامانه گرمایش-سرمایش بر مبنای گردش آب یا روغن استفاده شود. توزیع گرمایش در سامانه گردش سیال از یکنواختی بیشتری برخوردار است. بنابراین احتمال افزایش دمای موضعی و در نتیجه شروع واکنش پخت کاهش می‌یابد. دمای سیلندر از بخش خوراک‌دهی تا نازل تزریق به تدریج افزایش می‌یابد. گرمایش قالب به وسیله جریان روغن یا بخار داغ از داخل قالب یا نصب کارتریج‌های مقاومت الکتریکی انجام می‌گردد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، دمای قالب مورد استفاده برای آمیزه‌های CMC بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ و برای آمیزه BMC بین ۱۲۰ تا ۱۷۰ درجه سلسیوس تنظیم می‌شود.

۱۱-۵-٤ قالب

در فرآیند قالبگیری تزریقی از قالب‌های تک یا چندمحفظه‌ای استفاده می‌شود. قالب‌های چندمحفظه‌ای معمولاً برای افزایش سرعت تولید قطعه‌های کوچک به کار می‌روند. برای افزایش طول عمر و کارایی، از قالب‌های فولادی سخت ساخته می‌شوند. قالب‌های دستگاه تزریق در مقایسه با سایر روش‌های تزریق مانند RTM بسیار گرانتر هستند. شکل ۱۱-۷ ساده‌ترین نوع قالب تزریق یعنی قالب دونیمه‌ای را نشان می‌دهد. این قالب از دو نیمه تشکیل شده است که یکی از آنها بر روی بخش ثابت واحد مهار قالب نگه داشته می‌شود. گلوگاه قالب که واحد تزریق را به راهگاه‌های قالب متصل می‌کند، در این نیمه قرار دارد. راهگاه‌ها در بین دو نیمه قالب تعبیه شده و گلوگاه را به محفظه‌های قالب متصل می‌کنند. به این ترتیب هر محفظه قالب به یک راهگاه متصل است. راهگاه‌ها ممکن است گرم یا داغ باشند. چنانچه دمای راهگاه زیاد باشد (راهگاه داغ) آنگاه آمیزه موجود در آن نیز جامد و به همراه قطعه از قالب خارج شده و از آن جدا می‌گردد. در این شرایط تلفات مواد افزایش می‌یابد. اما اگر دمای راهگاه کم بوده به طوری که زیر دمای پخت رزین باشد (راهگاه گرم)، آنگاه آمیزهٔ درون راهگاه پخت نشده و در چرخه بعدی قالبگیری به درون قالب تزریق می‌شود. شکل ۱۱-۸ طراحی یک قالب دو نیمه‌ای با راهگاه گرم را نشان می‌دهد که دمای راهگاه با تعبیه مجراهای آب بر روی مقدار مورد نظر تنظیم می‌شود. درگاه در انتهای راهگاه و درست پیش از محفظه

قرار دارد. هر محفظه دارای حداقل یک درگاه تزریق است. نیمه دیگر قالب بر روی بخش متحرک واحد مهار قالب نصب می‌شود. میل‌پران‌ها بر روی این نیمه قالب قرار دارند. نیمه‌قالب روی واحد مهار، بین یک یا چند محفظه دارد. پس از پایان پخت، قطعه به صورت دستی در راستای گلوگاه، راهگاه‌ها و درگاه‌ها جدا می‌شود. مطابق با ۱۱-۹، ، عمل جدایش آمیزه سخت‌شده در گلوگاه و راهگاه‌ها در قالب سه‌صفحه‌ای، با یک صفحه میانی انجام می‌شود. به بیان دیگر، این صفحه میانی وظیفه جدا کردن قطعه از گلوگاه و راهگاه‌ها را دارد. در ادامه، عوامل تاثیرگذار بر طراحی قالب بررسی می‌شوند.

۱۱-۵-٤-۱ مواد

به دلیل بالا بودن میزان سایش، دما و فشار در فرآیند قالبگیری تزریقی آمیزه‌های CMC، معمولاً این قالب‌ها از فولاد مقاوم ساخته می‌شوند. اما در قالبگیری آمیزه BMC که دارای شرایط دمایی و فشاری ملایم‌تری است، مواد چون فولاد نرم، آلیاژهای چدن، روی ریخته‌گری و حتی در برخی موارد آلومینیوم نیز برای ساخت قالب قابل استفاده‌اند. قالب‌های کوچک را می‌توان از فولاد نرم برش داد. روی ریخته‌گری‌شده به ویژه برای ساخت قالب قطعه‌های بزرگ مناسب است چرا که شکل‌دهی و تراشکاری آن نسبتاً آسان است.

۱۱-۵-٤-۲ سختی سطح

به دلیل وجود تقویت‌کننده و انواع پرکننده‌ها در آمیزه‌های قالبگیری، سطح داخلی قالب تحت سایش شدید قرار دارد. از این‌رو بهتر است در صورت طولانی بودن بازه زمانی تولید و تعداد قطعه‌های تولیدی، سطح محفظه، درگاه‌ها و راهگاه‌های قالب به روش مناسبی سخت شود. به این منظور این سطوح با روش‌هایی چون آبکاری با کروم سخت، جذب نیتروژن[1]، پاشش یا رسوب فلزات سختی چون نیکل فسفردار آغشته به پلیمرها، کروم سخت، نیترید تیتانیوم و الماس سیاه (فیلم نازک کاربید بورون با دی‌سولفید تنگستن)، پوشش داده می‌شود. این سطوح صیقلی علاوه بر کاهش سایش به بهبود پرداخت سطح قطعه کمک می‌کند.

۱۱-۵-٤-۳ گلوگاه، راهگاه و درگاه

گلوگاه و راهگاه‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که افت فشار به حداقل برسد. برای این کار باید از گوشه‌های تیز و درگاه‌های باریک در طول مسیر جریان آمیزه اجتناب شده و مجراها از حداکثر قطر و حداقل طول ممکن برخوردار باشند. درگاه‌ها کنترل‌کننده سرعت پرشدن و مقدار جریان مواد به درون قالب هستند. از آن‌جایی که تنش برش اعمال‌شده به آمیزه در زمان

1- Nitriding

قالبگیری تزریقی، به ویژه به هنگام عبور از درگاه قالب باعث شکسته شدن الیاف تقویت‌کننده می‌شود، به همین دلیل باید درگاه‌های قالب تزریق آمیزه گرماسخت نسبت به پلاستیک‌های گرمانرم بزرگتر باشند. در شرایطی که استفاده از چندین درگاه تزریق ضروی باشد، آنگاه محل آنها باید به گونه‌ای طراحی شود که مقدار خط جوش به حداقل رسیده و ترجیحاً در بخش‌های کم‌تنش قطعه رخ دهد. بهتر است امکان تعویض درگاه‌ها که تحت بیشترین سایش هستند، در طراحی دیده شود. آمیزه BMC در مقایسه با CMC نسبت به جهتگیری الیاف حساس‌تر است. به همین دلیل الگوی جریان آمیزه به درون قالب از اهمیت بیشتری برخوردار است. به بیان بهتر، باید در طراحی راهگاه‌ها و درگاه‌ها سعی شود که یک جریان آرام در آنها و حتی در داخل محفظه قالب برقرار باشد.

۱۱-۵-٤-٤ گازگیری

گازگیری کافی از آمیزه در زمان پخت، به ویژه برای رزین‌های پخت‌شونده به روش تراکمی مانند فنولیک‌ها ضروری است. خروج ناکافی مواد فرار باعث ایجاد تاول، حفره یا خردشدن قطعه می‌شود. در واقع به هنگام باز شدن قالب، هوای محبوس به شدت منبسط می‌شود. اگرچه مقدار مواد فرار آمیزه BMC کمتر از آمیزه‌های CMC است، اما وجود دریچه در این نوع آمیزه‌ها نیز ضروری است. به همین دلیل قالب‌های فرآیند قالبگیری تزریقی معمولاً دارای دریچه‌هایی برای گازگیری از آمیزه هستند. این دریچه‌ها در خط جدایش نیمه‌های قالب، میل‌پران‌ها، بخش‌هایی که دیرتر پر می‌شوند و حتی در راهگاه‌ها تعبیه می‌گردند.

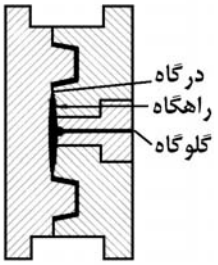
۱۱-۵-٤-۵ خروج آسان قطعه

برای کمک به خروج آسان قطعه، سطوح قالب باید از شیب کافی برخوردار باشند. به همین دلیل به هنگام تراشکاری قالب باید مقدار شیب حداقل ۲ درجه در نظر گرفته شود.

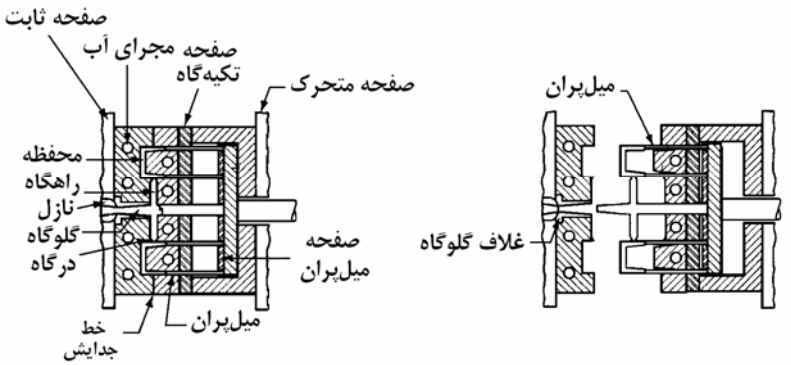
۱۱-۵-۵ واحد مهار قالب

قالب در یک واحد مهار نگهداری می‌شود. واحد مهار قالب باید قابلیت نگهداری قالب، اعمال نیروی کافی به نیمه‌های آن در برابر فشار آمیزه در مراحل تزریق و پخت و همچنین قابلیت باز کردن آن را در مرحله خروج قطعه را داشته باشد. هر چه ویسکوزیته آمیزه بیشتر باشد، نیروی لازم برای مهار قالب بیشتر خواهد بود. به این منظور از قفل ضامن‌دار یا سیلندرهای هیدرولیک یا ترکیبی از هر دو استفاده می‌شود. واحدهای مهار بر اساس نیروی قابل اعمال تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارت است از حداکثر نیروی قابل اعمال برای جلوگیری از باز شدن قالب. نیروی بستن قالب عامل اصلی تعیین‌کننده حداکثر ابعاد قطعه و وزن دستگاه است.

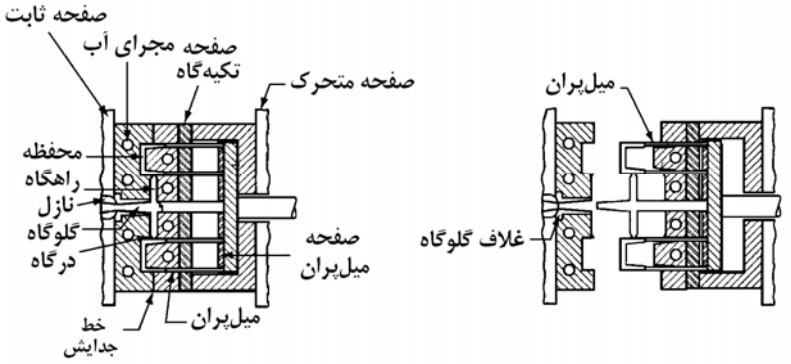
نیروی لازم برای بسته نگه داشتن قالب در زمان قالبگیری باید بیش از حاصلضرب فشار تزریق در اندازه تصویر سطح قطعه در صفحه جدایش نیمه‌های قالب است. معمولاً نیرویی بین دو تا سه برابر مقدار نیروی مورد اشاره به قالب‌ها اعمال می‌شود تا از ایجاد پلیسه جلوگیری شود. دستگاه‌های تزریق کوچک دارای واحد مهار با ظرفیت کمتر از ۱۰۰ تن هستند. نیروی مهار قالب ممکن است تا ۱۰۰۰۰ تن نیز افزایش یابد.



شکل ۱۱-۷- قالب دونیمه‌ای فرآیند قالبگیری تزریقی



شکل ۱۱-۸- طراحی قالب دونیمه‌ای با راهگاه گرم



شکل ۱۱-۹- طراحی قالب سه‌صفحه‌ای با راهگاه گرم

۱۱-٦ عوامل طراحی در فرآیند قالبگیری تزریقی

۱۱-٦-۱ ویسکوزیته

یکی از عوامل مهم در قالبگیری تزریقی، شکل نیمرخ سرعت آمیزه در زمان قالبگیری است. با نزدیک‌شدن به دیواره قالب، سرعت آمیزه به صفر و در عین حال تنش برشی وارد بر آن به حداکثر مقدار خود نزدیک می‌شود. این تنش برشی بر جهتگیری الیاف و تغییر آرایش آن در بخش‌های مختلف آمیزه تاثیرگذار است. بازتاب چنین تفاوتی در جهتگیری الیاف، به صورت تغییر مقاومت مکانیکی در بخش‌های مختلف قطعه نمایان می‌گردد. چون تنش برشی به ویسکوزیته آمیزه بستگی دارد، بنابراین رفتار رئولوژیکی یا به عبارتی تغییرات ویسکوزیته، تعیین‌کننده نیمرخ سرعت آمیزه است. از طرف دیگر، مهمترین مساله در قالبگیری تزریقی کامپوزیت‌های گرماسخت به درجه پخت ماده در مرحله تزریق مربوط است. اگر پخت آمیزه به مقدار زیادی پیش رفته باشد، فشار زیادی برای پرشدن قالب لازم است. حتی امکان پخت مواد پیش از رسیدن به محفظه قالب، یعنی در داخل راهگاه‌ها وجود دارد. برای جلوگیری از چنین شرایطی، آگاهی از تغییرات ویسکوزیته در اثر واکنش‌های پخت ضروری است. در واقع باید توازنی مناسبی بین پرشدن آسان، زمان قالبگیری و کیفیت قطعه برقرار شود.

آمیزه‌های گرماسخت در سرعت‌های برشی کم دارای ویسکوزیته زیادی هستند. اما با افزایش سرعت برشی، مقدار ویسکوزیته کاهش می‌یابد. چنین رفتار رئولوژیکی تحت عنوان رفتار شبه‌پلاستیک[1] نامیده می‌شود. شکل ۱۱-۱۰ تغییرات ویسکوزیته بر حسب سرعت برشی را در این نوع آمیزه‌ها نشان می‌دهد. چون سرعت برشی آمیزه در زمان تزریق بسیار زیاد است، بنابراین سرعت برشی تاثیر زیادی بر کاهش ویسکوزیته دارد. وابستگی ویسکوزیته آمیزه به سرعت برشی مطابق با رابطه (۱۱-۱) به صورت قانون توانی بیان می‌شود:

$$\eta = \eta_{\circ} \dot{\gamma}^{n-1} \qquad (۱-۱۱)$$

که در این رابطه:

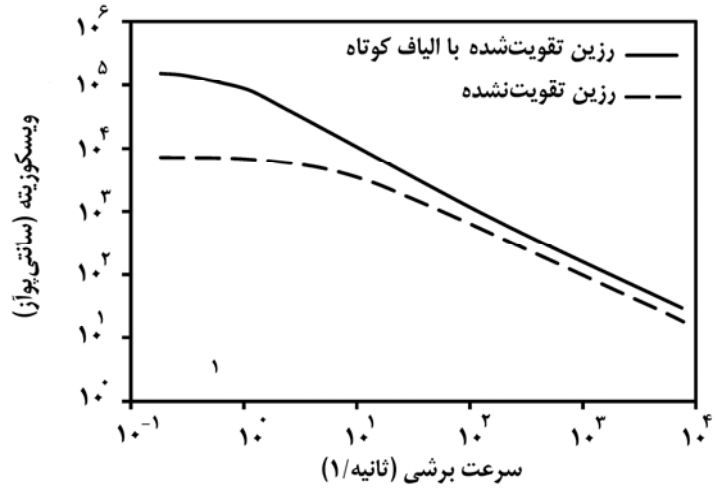
η ویسکوزیته آمیزه،

$\eta_{\circ}$ ثابت وابسته به نوع آمیزه و شرایط دما و فشار،

$\dot{\gamma}$ سرعت برشی،

n شاخص قانون توانی.

1- Pseudo-plastic



شکل ۱۱-۱۰- ویسکوزیته برحسب سرعت برشی

مطابق با شکل ۱۱-۱۱، نیمرخ سرعت سیال با رفتار نیوتونی ($n = ۱$) و قانون توانی ($n < ۱$) در یک لوله، به ترتیب به شکل سهمی و تا اندازه‌ای مسطح است. با نزدیک‌شدن n به صفر، جریان تخت[1] برقرار می‌شود. در این نوع جریانت، نش برشی تنها در سطح دیواره وجود دارد. افزودن تقویت‌کننده و پرکننده به رزین باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود. این افزایش به غلظت، نسبت طول به قطر و چگونگی پراکنش ماده افزوده‌شده بستگی دارد. رابطه (۱۱-۲) که به نام معادله مونی[2] شناخته می‌شود، برای تخمین ویسکوزیته آمیزه بر اساس عوامل مورد اشاره به کار می‌رود:

$$ln\frac{\eta}{\eta_r} = \frac{k_E \nu}{۱ - \nu/\nu_{max}} \qquad (۱۱-۲)$$

که در این رابطه:

η ویسکوزیته آمیزه،

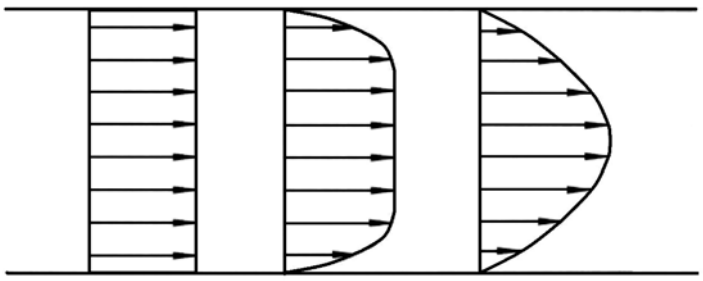
η_r ویسکوزیته رزین،

k_E ضریب اینشتین،

ν کسر حجمی ماده افزوده‌شده (تقویت‌کننده و یا پرکننده)،

ν_{max} حداکثر کسر حجمی ممکن برای ماده افزوده‌شده.

1- Plug flow
2- Mooney equation



شکل ۱۱-۱۱- نیمرخ سرعت سیال در یک مجرای لوله‌ای برای سه شاخص مختلف قانون توانی

حداکثر کسر حجمی نشان‌دهنده مقداری از کسر حجمی است که در بالاتر از آن، مقدار کافی از رزین برای دربرگرفتن تمام ماده افزوده‌شده وجود ندارد. ضریب‌های k_E و ν_{max} به نسبت طول به قطر و میزان آرایش‌یافتگی ماده افزوده‌شده بستگی دارد. هر دو ضریب با افزایش نسبت طول به قطر و همچنین جهتگیری در یک راستای خاص، افزایش می‌یابند. به عنوان نمونه مقدار ضریب k_E برای پرکننده کروی‌شکل (با نسبت طول به قطر ۱) برابر ۲/۵ و برای الیاف با افزایش نسبت طول به قطر، افزایش می‌یابد. همچنین اگر الیاف در یک راستا با آرایش شش‌گوش جهتگیری کنند، مقدار ضریب ν_{max} حدود ۰/۹ بوده و با نزدیک‌شدن آرایش الیاف به جهتگیری تصادفی، به صفر نزدیک می‌شود. رابطه تجربی (۱۱-۳)، ارتباط بین حداکثر کسر حجمی را برحسب نسبت طول به قطر برای حالت جهتگیری تصادفی نشان می‌دهد:

$$\nu_{max} = \frac{۱}{۱/۳۸ + ۰/۰۳۷۶ \left(l_f / d_f\right)^{۱/۴}} \qquad (۳-۱۱)$$

که در این رابطه l_f و d_f به ترتیب طول و قطر الیاف هستند. بررسی‌های نشان می‌دهد که با افزودن الیاف تقویت‌کننده به رزین، ویسکوزیته آمیزه در سرعت‌های برشی کم به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. هر چه طول الیاف بیشتر باشد، این افزایش شدیدتر خواهد بود. اما با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت طول الیاف تاثیر زیادی بر افزایش ویسکوزیته ندارد (شکل ۱۱-۱۰). شیب منحنی در این حالت نزدیک به ۱ است. بنابراین شاخص قانون توانی نزدیک به صفر و در نتیجه نیمرخ سرعت جریان آمیزه در داخل مجراهای تزریق به شکل مسطح بوده و در نتیجه جریان از نوع تخت است.

۱۱-٦-۲ نرم‌سازی گرمایشی و مکانیکی

اگرچه با انجام عملیات نرم‌سازی، ویسکوزیته آمیزه کاهش یافته و فرآیند تزریق آسان‌تر می‌شود، اما احتمال تخریب رزین و تقویت‌کننده نیز افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی قطعه تولیدی ویژگی‌های مورد انتظار را نخواهد داشت. عملیات نرم‌سازی به وسیله انتقال گرما از سیلندر به آمیزهٔ در حال چرخش، افزایش گرمای ناشی از تنش برشی ایجادشده در اثر چرخش پیچ و همچنین جریان سریع آمیزه در زمان تزریق انجام می‌شود. از این‌رو با تنظیم گرمکن‌های سیلندر و نازل، طراحی پیچ، سرعت چرخش پیچ و مقدار پس‌فشار می‌توان نرم‌شدگی را کنترل کرد. برای کنترل دمایی بهتر سیلندر، از دو تا چهار منطقه گرمایی استفاده می‌شود. ذوب آمیزه CMC در فاصله‌ای بین دو تا سه برابر قطر سیلندر رخ می‌دهد. دمای گرمکن‌های این منطقه بر روی حداکثر مقداری تنظیم می‌شوند که موجب ژل‌شدن، تخریب یا سوختگی آمیزه نشود. مقدار این دما با افزایش سرعت چرخش پیچ کاهش می‌یابد. چون پیچ در مرحله پیش از تزریق برای مدت نسبتاً طولانی از چرخش بازمی‌ایستد، از این‌رو معمولاً دمای سیلندر از انتهای بخش خوراک‌دهی تا نازل به تدریج افزایش می‌یابد. اما دمای نازل به طور جداگانه کنترل می‌شود. برای جلوگیری از سوختن رزین در اثر تنش برشی شدید در زمان تزریق، این دما باید کمتر از دمای انتهای سیلندر باشد. کاهش قطر نازل، راهگاه و درگاه منجر به افزایش سرعت برشی و افزایش احتمال سوختن آمیزه می‌شود. اعمال تنش برشی در مرحله نرم‌سازی و تزریق، موجب سایش و شکستگی الیاف و همچنین سایش پیچ و سیلندر می‌شود. از این‌رو برای تزریق آمیزه‌های تقویت‌شده بهتر است از سرعت پیچ، سرعت تزریق و پس‌فشار کمتری استفاده شود. اگرچه انتقال گرمای بین سیلندر و آمیزه با افزایش پس‌فشار بهبود می‌یابد، اما افزایش بیش از حد این فشار باعث کاهش شدید طول الیاف و مقدار آمیزه تزریقی می‌گردد.

۱۱-٦-۳ فشار تزریق

فشار ناکافی باعث پرشدن ناکامل قالب، جمع‌شدگی زیاد، پرداخت بد سطح و رواداری ابعادی غیردقیق می‌شود. فشار تزریق با توجه به قطر پیچ و ظرفیت اعمال نیروی بازوی هیدرولیک پشت پیچ تنظیم شده و به ویسکوزیته آمیزه، طول و قطر گلوگاه و راهگاه‌ها بستگی دارد. جریان آمیزه به قالب در دما و فشار ثابتی انجام نمی‌شود. با جابه‌جایی پیچ، فشار آمیزهٔ جلوی پیچ افزایش می‌یابد. افزایش دمای ناشی از این فشرده‌سازی از رابطه (۱۱-٤) محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_c = \alpha T_\circ \frac{\Delta P_c}{\rho_\circ C_p} \qquad (۱۱-٤)$$

که در این رابطه:

ΔT_c افزایش دمای آمیزه در اثر فشردگی پیش از تزریق،

ΔP_c افزایش فشار آمیزه در اثر فشردگی پیش از تزریق،

$T_\circ$ دمای آمیزه فشرده‌نشده در انتهای سیلندر،

$\rho_\circ$، C_p و α چگالی، ظرفیت گرمایی و ضریب انبساط گرمایی آمیزه غیرفشرده در دمای $T_\circ$.

در زمان تزریق، فشار آمیزه در دهانه نازل تا جبهه جریان، از فشار تزریق به فشار صفر کاهش می‌یابد. این کاهش فشار منجر به کاهش دما می‌شود. کار انجام‌شده بر روی آمیزه نیز باعث افزایش دما می‌شود. رابطه (۱۱-۵) افزایش دمای آمیزه را در اثر این دو پدیده نشان می‌دهد:

$$\Delta T_i = \frac{\Delta P_i}{\rho_i C_p}\left(1 - \alpha T_i\right) \qquad (۱۱-۵)$$

که در این رابطه:

ΔT_i افزایش دما در زمان تزریق،

ΔP_i اختلاف فشار آمیزهٔ موجود در نازل و جبهه جریان در زمان تزریق،

T_i دمای آمیزه فشرده‌شده در انتهای سیلندر،

ρ_i چگالی آمیزه فشرده‌شده در دمای T_i.

مثال ۱۱-۱- اگر دمای آمیزهٔ CMC آماده تزریق ۹۰°C و فشار تزریق ۷۵۰ بار باشد، افزایش دمای ناشی از تزریق را محاسبه کنید. چگالی آمیزه ۱۸۲۰ Kg/m³، ضریب انبساط گرمایی ۳×۱۰⁻⁵ °K⁻¹ و ظرفیت گرمایی ویژه ۰/۸۴۱ KJ/Kg.K است.

حل- با توجه به رابطه (۱۱-۵) داریم:

$$\Delta T_i = \frac{\Delta P_i}{\rho_i C_p}\left(1 - \alpha T_i\right) = \frac{۷/۵\times۱۰^{۷}}{۱۸۲۰\times۸۴۱}\left(۱ - ۳\times۱۰^{-۵}\times۳۶۳\right) = ۴۸^{\circ}C$$

۱۱-۶-۴ سرعت تزریق

سرعت تزریق عبارت است از سرعت جابه‌جایی پیچ در زمان تزریق. چون افزایش سرعت تزریق دارای اثرات مثبت و منفی است، به همین دلیل کنترل آن بسیار مهم است. با در نظر گرفتن رفتار شبه‌پلاستیک آمیزه‌های گرماسخت، افزایش سرعت تزریق به کاهش ویسکوزیته آمیزه و در نتیجه جریان‌پذیری آن کمک می‌کند. همچنین سرعت زیاد تزریق آمیزه به هنگام ورود به قالب باعث گرمایش بی‌دررو آن شده و در نتیجه سرعت پخت آن را افزایش می‌دهد. اما از طرف دیگر، در صورت افزایش بیش از حد دما، احتمال تخریب و سوختن رزین وجود دارد. همچنین با افزایش سرعت تزریق، سایش قالب به وسیله الیاف و شکستگی الیاف افزایش

می‌یابد. موضوع مهم دیگر، چگونگی جریان آمیزه در قالب است. با افزایش بیش از حد سرعت تزریق، جریان آمیزه در مجراهای باریک (گلوگاه و راهگاه‌ها) به جریان تخت نزدیک خواهد شد. زمانی که آمیزه با این نوع جریان وارد محفظه قالب می‌شود، پرشدن قالب با یک الگوی نامنظم مارگونه[1] انجام می‌شود. در این شرایط جهتگیری الیاف کاملاً غیرقابل کنترل شده و در نتیجه ویژگی‌های بخش‌های مختلف قطعه متفاوت خواهد بود. بهتر است با کاهش سرعت تزریق و در نتیجه افزایش زمان چرخه قالبگیری، پرشدن قالب با یک الگوی منظم انجام شود. این موضوع به ویژه از نظر جهتگیری الیاف و تاثیر آن بر ویژگی‌های مکانیکی با اهمیت است. با توجه به اهمیت این پارامتر در فرآیند قالبگیری تزریقی، سرعت تزریق در دستگاه‌های جدید قابل تغییر است. به طوری که به جای استفاده از یک سرعت تزریق ثابت، شروع تزریق با سرعت کمی آغاز می‌شود تا از وقوع پدیده جهش آمیزه به قالب جلوگیری شود. سپس سرعت تزریق در مراحل میانی افزایش می‌یابد. در پایان تزریق دوباره سرعت تزریق کاهش می‌یابد تا از ایجاد پلیسه و محبوس شدن هوا جلوگیری شود.

۱۱-۶-۵ جریان آمیزه در قالب

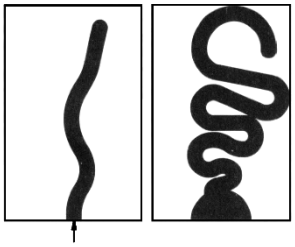
چگونگی جریان آمیزه به درون قالب بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی قطعه تاثیرگذار است. یکی از مشکلات مهم در آمیزه‌های گرماسختِ دارای مقدار زیادی از پرکننده، پدیده جهش[2] آمیزه به درون محفظه قالب است. همان‌طور که شکل ۱۱-۱۲ نشان می‌دهد، این پدیده باعث جهش مواد به صورت یک رشته به درون محفظه قالب می‌شود. اگرچه ممکن است بقیه مواد به صورت شعاعی (که جریان مطلوب است) وارد قالب شود، اما وجود ماده جهش‌کرده به قالب سبب ایجاد خط جوش با مواد بعدی می‌گردد. این خطوط جوش مقاومت کمتری دارند. طراحی مناسب درگاه قالب، هدایت غیرمستقیم آمیزه به درون قالب از طریق طراحی یک دیوار در مقابل درگاه و همچنین تغییر شرایط فرآیند از بروز چنین پدیده‌ای جلوگیری می‌کند.

وجود مغزی در قالب یا طراحی چندین درگاه برای قالب موجب تقسیم جریان آمیزه به چند جبهه و ایجاد خط جوش می‌شود. این مشکل به ویژه در قطعه‌های دارای الیاف بلند و کسر حجمی بالا به چشم می‌خورد. طراحی صحیح محل درگاه‌ها از ایجاد خط جوش در بخش‌های حساس‌تر قطعه جلوگیری می‌کند. در این موارد باید از محبوس‌شدن هوا نیز جلوگیری شود. به عنوان نمونه، شرایط شکل ۱۱-۱۳-ب بهتر از ۱۱-۱۳-الف است و در شکل ۱۱-۱۳-پ، جهت خط جوش با تغییر آرایش درگاه‌های قالب تغییر کرده است.

1- Snaking
2- Jetting

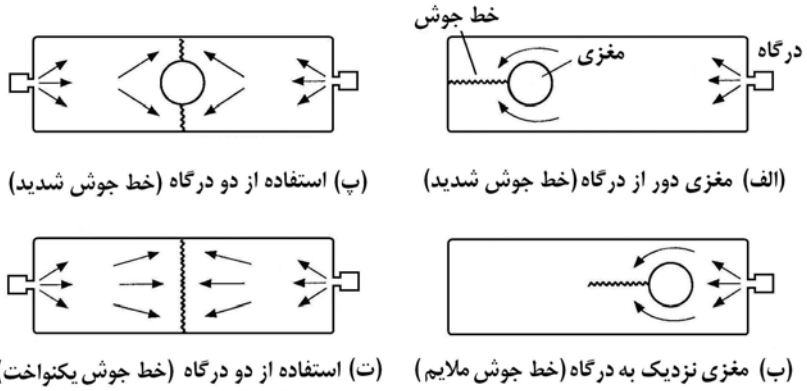
۱۱-٦-٦ جهتگیری ذرات در اثر جریان

تاریخچه جریان و دمای آمیزه می‌تواند تعیین‌کننده نوع جهتگیری الیاف در زمان تزریق باشد. کنترل جهتگیری الیاف در اثر جریان آمیزه به درون قالب، تاثیر بسیار زیادی در دستیابی به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد انتظار از قطعه دارد. یکی از مشکلات قطعه‌های تقویت‌شده آن است که جهتگیری الیاف به طور عمده به وسیله جریان آمیزه و هندسه قطعه کنترل می‌شود. در نتیجه امکان تغییر مقاومت بخش‌های مختلف قطعه وجود دارد. ریان فورانی[1] در جبهه جریان باعث جهتگیری الیاف لایه سطح بیرونی قطعه در جهت جریان می‌شود. اما جریان شعاعی[2] موجود در نزدیکی درگاه تزریق باعث ایجاد جهتگیری تصادفی در لایه‌های میانی می‌گردد. برای کمی‌کردن جهتگیری الیاف لازم است توابعی برای این عامل تعریف شوند. رابطه (۱۱-٦) نمونه‌ای از تابع میانگین جهتگیری الیاف موجود در یک صفحه را نشان می‌دهد:



زمان پرشدن زمان تزریق

شکل ۱۱-۱۲- پدیده جهش در زمان‌های مختلف قالبگیری تزریقی



۱۱-۱۳- ایجاد خط جوش در قطعه در فرآیند قالبگیری فشاری

1- Fountain Flow
2- Radial Flow

$$f = ۲\frac{\sum_{\theta=۰}^{\theta=\pi/۲} n_\theta \cos^۲\theta}{\sum_{\theta=۰}^{\theta=\pi/۲} n_\theta} - ۱ \qquad (۶-۱۱)$$

که در این رابطه:

f تابع جهتگیری الیاف،

θ زاویه جهتگیری الیاف،

n_θ تعداد الیاف جهتگیری‌کرده تحت زاویه θ.

مقدار f بین ۱ (جهتگیری کامل در جهت جریان) تا ۱- (جهتگیری کامل عمود بر جهت جریان) تغییر می‌کند. مقدار تابع جهتگیری برای آرایش تصادفی الیاف برابر با صفر است. جهتگیری الیاف از جریان برشی و کششی تاثر می‌پذیرد. اصولاً در فرآیند قالبگیری تزریقی، جهتگیری ناشی از جریان کششی غالب است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در جریان برشی آمیزه از داخل مجرایی با سطح مقطع ثابت دایره‌ای، میزان جهتگیری الیاف تابعی از مقدار و زمان اعمال تنش برشی است. به این ترتیب با افزایش تنش برشی از مرکز مجرا به سمت دیواره، جهتگیری بیشتری در جهت جریان صورت می‌گیرد. اما زمان نسبتاً زیادی برای ایجاد جهتگیری قابل توجه در الیاف نیاز است. همچنین در جریان کششی ناشی از تغییر سطح مقطع مجرای جریان، در صورت همگرا بودن جریان (کاهش سطح مقطع) الیاف به مقدار زیادی در جهت جریان جهتگیری می‌کنند. در جریان واگرا (افزایش سطح مقطع)، الیاف در جهت عمود بر جهت اصلی جریان جهتگیری می‌کنند. مقدار تغییر زاویه الیاف در جریان کششی از رابطه (۷-۱۱) قابل تخمین است:

$$\frac{\tan\psi}{\tan\psi_۰} = \left(\frac{A}{A_۰}\right)^{\frac{۳}{۲}\chi} \qquad (۷-۱۱)$$

که در این رابطه:

ψ و $\psi_۰$ به ترتیب زاویه نهایی و اولیه الیاف نسبت به خط جریان،

A و $A_۰$ سطح مقطع نهایی و اولیه مجرای جریان،

χ پارامتر وابسته به نسبت طول به قطر الیاف.

پارامتر χ از رابطه (۸-۱۱) قابل محاسبه است:

$$\chi = \frac{(l/d)^۲ - ۱}{(l/d)^۲ + ۱} \qquad (۸-۱۱)$$

۱۱-۷ انواع دیگر فرآیند قالبگیری تزریقی

۱۱-۷-۱ قالبگیری تزریقی-فشاری

فرآیند قالبگیری تزریقی-فشاری[1] گونه دیگری از قالبگیری تزریقی و در واقع ترکیبی از فرآیندهای قالبگیری تزریقی و فشاری است. در این فرآیند، ضمن برخورداری از برتری‌های نرم‌سازی و جابه‌جایی آمیزه با استفاده از پیچ، نیروی لازم برای بستن قالب، کمتر از قالبگیری تزریقی و در حد قالبگیری فشاری است. با توجه به شکل ۱۱-۱٤، در این فرآیند، مواد نرم‌شده به وسیله پیچ، بدون اعمال فشار زیاد به درون یک قالب نیمه‌بسته تزریق می‌شود. قالب می‌تواند در زمان تزریق آمیزه به درون آن تا اندازه‌ای باز شود. مقدار بازشدن قالب به کمک نگهدارنده‌های مکانیکی کنترل می‌شود؛ به طوری که حجم محفظه قالب در زمان تزریق بسیار بیشتر از زمان قالبگیری است. برخلاف قالبگیری تزریقی، محفظه قالبِ نیمه‌بسته در زمان تزریق به صورت کامل پر نمی‌شود. پس از تزریق مقدار مشخصی از آمیزه، مرحله قالبگیری فشاری با جابه‌جایی بازوی پشت نیمه متحرک قالب آغاز می‌شود. حرکت نیمه متحرک به طرف نیمه ثابت قالب باعث جابه‌جایی آمیزه و پرشدن محفظه قالب می‌شود. جابه‌جایی بازو تا جایی ادامه می‌یابد که حجم محفظه به حجم مورد نظر برای قطعه برسد. اگرچه این کار منجر به افزایش فشار محفظه می‌گردد، اما این فشار در مقایسه با فشار قالبگیری تزریقی کمتر است. به همین دلیل این روش به ویژه برای تولید قطعه‌های بزرگ مناسب است. فشار قالب به نیروی اعمال‌شده توسط بازو بستگی داشته و مستقل از فشار تزریق است. در واقع پیچ تنها به عنوان ابزاری برای بارگیری محفظه قالب از آمیزه عمل کرده و برخلاف فرآیند قالبگیری تزریقی، نقش اعمال فشار در زمان قالبگیری را ندارد. گرمای قالب باعث پخت قطعه می‌شود. اما چون گازگیری یکی از موارد مهم در ساخت قطعه‌های بزرگ است، بنابراین در این فرآیند نیز، قالب پیش از ژل‌شدن آمیزه، یک یا دو بار به مقدار کمی باز می‌شود. با اعمال مجدد فشار پس از گازگیری، قطعه تحت فشار و دمای قالب پخت شده و سپس خارج می‌گردد. این فرآیند برای ساخت قطعه‌های مسطح بزرگ و ساده، مناسب است. قالبگیری چنین قطعه‌هایی با قالبگیری تزریقی نیاز به نیروی زیادی برای بستن قالب دارد. به دلیل فشار کم تزریق آمیزه به درون قالب، جهتگیری الیاف در اثر جریان به حداقل می‌رسد. سایر برتری‌ها عبارتند از کاهش تلفات مواد (عدم استفاده از راهگاه)، نبودن خط جوش و نیاز به قالب ارزان‌تر.

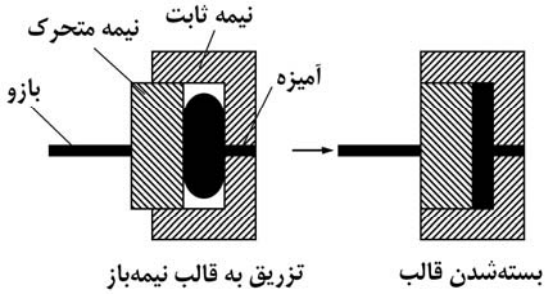
1- Injection-Compression Molding

۱۱-۷-۲ قالبگیری تزریقی با گلوگاه توخالی

در روش قالبگیری تزریقی با گلوگاه توخالی[1]، یک مغزی در گلوگاه قرار داده می‌شود تا وزن آمیزه درون گلوگاه و در نتیجه تلفات مواد کم شود. از طرفی به دلیل آن که اغلب گلوگاه یکی از ضخیم‌ترین بخش‌هاست، بنابراین با استفاده از گلوگاه توخالی زمان پخت به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۱۱-۷-۳ قالبگیری تزریقی با مغزی فداشونده

یکی از کاستی‌های فرآیند قالبگیری تزریق آن است که برای ساخت قطعه‌های توخالی مناسب نیست. این مشکل در فرآیند قالبگیری تزریقی مغزی فداشونده برطرف شده است. در این فرآیند نخست یک مغزی زودگداز از جنس آلیاژ بیسموت-قلع به شکل مورد نظر قالبگیری شده و سپس در مرکز قطعه در قالب تزریق قرار داده می‌شود. آمیزه تزریق‌شده به درون قالب، در اطراف مغزی قالبگیری می‌شود. پس از پایان قالبگیری تزریقی، مغزی مورد اشاره در مرحله پخت نهایی ذوب شده و از قطعه خارج می‌شود. آلیاژ ذوب‌شده دوباره برای قالبگیری بعدی استفاده می‌شود. این فرآیند برای ساخت راکت تنیس و همچنین پمپ آب یکپارچه (بدون محل اتصال) خودرو استفاده شده است.



شکل ۱۱-۱۴- طرحواره‌ای از قالبگیری تزریقی-فشاری

1- Hollow sprue molding (Hot cone molding)