مقایسه انقباض به وجود آمده در قطعات پلاستیکی تزریق شده در قالب‌هایی از جنس آلیاژهای با دمای ذوب پایین و رزین اپوکسی

جمال زمانی اشنی[۱] و رضا گودرزی[۲]
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(تاریخ دریافت: ۸۸/۰۸/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۱۴)

چکیده

در این مقاله، مقایسه انقباض در قطعات ساخته شده توسط تزریق پلاستیک، با استفاده از قالب‌هایی از جنس رزین اپوکسی و آلیاژهای فلزی با نقطه ذوب پایین انجام می‌پذیرد. برای این منظور، در مرحله اول، دو قالب مکعب مستطیل از جنس رزین اپوکسی و یک آلیاژ با دمای ذوب پایین (MCP ۱۵۰) ساخته شده است. با استفاده از یک دستگاه تزریق، دو نوع پلیمر، (یکی پلی اتیلن و دیگری پلی استیرن) در قالب‌ها، تزریق و سپس، ابعاد دقیق قطعات و انقباض متأثر از جنس قالب‌ها (رزین اپوکسی و آلیاژ فلزی) اندازه‌گیری شد. همچنین در ادامه، تأثیر پارامترهای تزریق بر روی انقباض در قطعات، بررسی گردید، این پارامترها شامل فشار تزریق، زمان نگهداری و دمای پلیمر مذاب بوده است. نتایج تحقیق مبین کاهش درصد انقباض در قطعات پلی اتیلنی، ساخته شده در قالب آلیاژ با دمای ذوب پایین می‌باشد. میزان کاهش طول و عرض و ارتفاع، به ترتیب عبارتند از: ۰/۶۲ ، ۰/۴۶ و ۰/۷۵. قطعات پلی استیرن ساخته شده به وسیله هر دو قالب، تقریباً دارای درصد انقباض مشابه می‌باشند. همچنین افزایش مقدار فشار تزریق و زمان نگهداری آن، باعث کاهش چشمگیر درصد انقباض قطعات، در هر دو قالب است.

واژه‌های کلیدی: قالب تزریق پلاستیک، ابزارسازی سریع، انقباض، آلیاژ با دمای ذوب پایین، رزین اپوکسی

The Shrinkage Comparison of Plastic Injection Molding inserts, Made of Low Melting Point Metal Casting Alloy and Epoxy Resin Material

J. Zamani-Ashani and R. Goudarzi
Mech. Eng. Dep't.
Kh.N. Toosi Univ. of Tech.
(Receipt date: 26 August, 2009; Accept date: 2 February, 2013)

ABSTRACT

This paper compares the shrinkage of the components manufactured by injection molding, using inserts made of epoxy resin and metal alloys with low melting point (LMPA). For this purpose, in first stage, two cube molds (inserts) manufactured by epoxy resin and a low melting point alloy (150MCP). At the using an injection machine, two types of polymers, (polyethylene and polystyrene) were injected into the inserts. Then exact dimensions of the injected components, plus shrinkage caused by inserts materials, (epoxy resin and metal alloys with low melting point) were measured. Also, the effect of injection parameters on shrinkage of the components, investigated, these parameters include injection pressure, holding time and temperature of the polymer melt. The results indicate a reduction in shrinkage in components of polyethylene, which is made in LMPA insert. Reduction in length and width and height are 62/0, 46/0 and 75/0 respectively. Polystyrene components made by both inserts, have about the same percentage of the shrinkage. Increasing the injection pressure and holding time, significantly reduced the shrinkage of components in both inserts.

Keywords: Plastic Injection Molding Insert, Rapid Tolling, Shrinkage, Low Melting Point Metal, Epoxy Resin

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir
۲- کارشناس ارشد: r.goudarzi@ymail.com

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک با استفاده از روش‌های سنتی به ویژه برای تولید حجم کمی از قطعات، پرهزینه و زمانبر است. امروزه با پیشرفت و توسعه روش‌های مختلف ابزارسازی سریع، سعی شده تا با کاربرد روش‌های مختلف، هزینه و زمان تولید کاهش داده شود. تعدادی از این روش‌ها شامل ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک با استفاده از دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع، مواد سیلیکونی، رزین اپوکسی و به تازگی آلیاژهای با دمای ذوب پایین است. با توجه به تعداد قطعه مورد نیاز و امکانات موجود، یکی از روش‌های ذکر شده برای ساخت سریع قالب تزریق استفاده می‌شود. یکی از مواردی که در طراحی قطعات پلاستیکی اهمیت بسیار دارد، اطلاع از مقدار انقباض پلیمر در قالب است و با توجه به شرایط قالب، این مقدار تغییر می‌کند. نمودارهای مقادیر انقباض پلیمرهای مختلف برای قالب‌های فولادی جهت استفاده در صنعت در مراجع مختلف موجود بوده و ضروری است این مقادیر برای استفاده کاربردی از قالب‌هایی که از روش‌های ابزارسازی سریع نیز ساخته می‌شوند به دست آورده شوند. بدین منظور، در این تحقیق به بررسی و مقایسه انقباض به وجود آمده در قطعاتی از جنس دو پلیمر پرکاربرد پلی‌اتیلن و پلی‌استیرن که در قالب‌هایی از جنس رزین اپوکسی و آلیاژ با دمای ذوب پایین MCP ۱۵۰[1] (نام تجاری آلیاژ با دمای ذوب پایین ساخت شرکت MCP آلمان) تزریق می‌شود پرداخته شده است. همچنین تأثیر پارامترهای تزریق شامل فشار تزریق، زمان نگهداری فشار و دمای پلیمر مذاب روی انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی نیز بررسی شده است. برای بررسی انقباض در جهت‌های متفاوت جهت جریان پلیمر در قالب، انقباض در سه موضع طول، عرض و ضخامت قطعه مکعب مستطیل شکل اندازه‌گیری شده است. خصوصیات حرارتی مواد سازنده حفره‌های قالب، متغیر بسیار مؤثر در این آزمایش‌ها است.

۱- ۱- مروری بر تحقیقات انجام شده

امروزه با پیشرفت روزافزون صنعت و رقابتی شدن محصولات، شرکت‌های تولید کننده برای بقاء ناچارند محصولات خود را با تنوع و سرعت بالاتر و صرف هزینه پایین‌تر به بازار عرضه کنند. برای این منظور، این شرکت‌ها ناگزیرند به جای روش‌های تولید سنتی از روش‌های تولید جدید شامل ابزارسازی سریع استفاده کنند. در این راستا برای ساخت قطعات پلاستیکی به جای استفاده از قالب‌های فولادی از قالب‌های استریولیتوگرافی، سیلیکونی و رزینی استفاده می‌شود. به تازگی با ابداع سودرشان[2] از آلیاژهای با دمای ذوب پایین نیز برای ساخت قالب‌های تزریق استفاده می‌شود که نسبت به دیگر مواد مورد استفاده در ساخت سریع قالب‌های تزریق دارای مزایای استحکام، مقاومت به سایش و ضریب انتقال حرارت بالاتر است [۱].

هر پلیمر بسته به جنس قالبی که در آن تزریق می‌شود شرایط مخصوص به خود را برای تزریق دارد. مواد قالب‌گیری مختلف بدون استفاده از گرم‌کاری یا خنک‌کاری قالب، سرعت‌های بسیار متفاوتی از خنک‌کاری قطعات تزریقی را نشان می‌دهند زیرا دارای خصوصیات انتقال حرارت ذاتی متفاوتی می‌باشند. بسیاری از پلیمرها با توجه به شرایط مختلف خنک‌کاری قطعات در طول فرآیند قالب‌گیری، درصد انقباض‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

جهت تولید محصولات با کیفیت بالا، کلیه پارامترهای تزریق و درصد انقباض ایجاد شده در قطعات پلاستیکی تزریق شده در قالب‌های سنتی فولادی در مراجع مختلف موجود بوده و ضروری است این مقادیر برای قالب‌هایی که از روش‌های ابزارسازی سریع ساخته شده‌اند نیز به دست آورده شود. از این رو تحقیقات گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف در این زمینه صورت گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ولارد[3]، پیتل[4] و پیریک[5] در سه تحقیق جداگانه به بررسی شرایط مختلف تزریق از جمله فشار، زمان نگهداری فشار، دمای پلیمر مذاب، جنس قالب و ...، بر انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی پرداخته اند [۴-۲].

سودرشان [۱] در تحقیق دیگری، بررسی اولیه بر روی ساخت اینسرت‌های[6] قالب‌های تزریق پلاستیک با استفاده از آلیاژهای با دمای ذوب پایین و مقایسه آن با قالب فولای انجام داده است. این مقایسه شامل دقت ابعادی و تعداد قطعات تولیدی قالب‌ها است و در آن نشان داده شده که در تولیدات با حجم پایین می‌توان از قالب‌های که از جنس آلیاژهایی با دمای ذوب پایین هستند به جای قالب‌های سنتی فولادی استفاده کرد و هزینه و زمان تولید را کاهش داد.

1- Include of Sn, Bi, Pb

2- Sudershan
3- Velarde
4- Patel
5- Pierick
6- Inserts

Archive of SID

www.SID.ir

همچنین هریس[1] [۵] در تحقیقی دیگر به بررسی و مقایسه انقباض قطعات تزریق شده از دو جنس پلیمر کریستالی پلی‌آمید و آمورف ABS در دو قالب، که یکی از آنها با استفاده از روش ابزارسازی سریع استریولیتوگرافی و دیگری با استفاده از روش سنتی ساخته شده از آلومینیوم، پرداخته است. در این تحقیق نشان داده شده که انقباض قطعات از جنس پلیمر کریستالی پلی‌آمید در قالب استریولیتوگرافی نسبت به قالب آلومینیومی بیشتر بوده و با تغییرات شرایط تزریق تا مقدار زیادی بهبود می‌یابد. همچنین نشان داده شد که انقباض قطعات از جنس پلیمر آمورف ABS در هر دو قالب یکسان بوده و مستقل از جنس قالب است. در تحقیق دیگری از هریس [۶] که در ادامه تحقیق بالا می‌باشد نشان داده شده که افزایش انقباض قطعات تزریقی در قالب استریوگرافی تا درصد زیادی به دلیل افزایش یافتن ساختارهای کریستالی در قطعات است و ضریب انتقال حرارت مواد سازنده قالب تأثیر بالایی در تبلور و ایجاد ساختار کریستالی پلیمرها داشته و آن را تا ۳۰ درصد در قطعات تزریق شده در قالب استریوگرافی افزایش داده است.

در بررسی دیگری، چه[2] و چووا[3] [۷]، ابعاد دقیق قطعه H شکل تولید شده توسط قالب سخت[4] و قالب نرم[5] را تعیین کرده و همچنین پارامترهای تزریق برای استفاده در فشار پایین تزریق پلیمر را بهینه نموده‌اند.

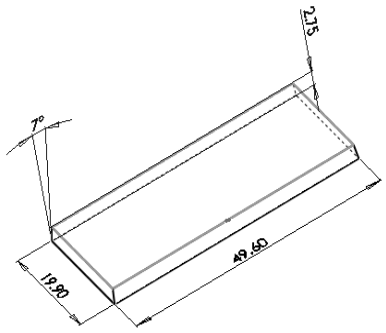
با توجه به عمر کمی که از کاربرد ابزارسازی سریع در ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک می‌گذرد، تاکنون مرجع کاملی (به صورت مراجعی که برای قالب‌های فولادی موجود است) به بیان تأثیر پارامترهای مختلف تزریق بر روی کیفیت قطعات تزریقی نپرداخته و پژوهشگران اندکی به صورت موردی، بررسی‌هایی بر روی بعضی از مواد قالب‌گیری انجام داده‌اند. همچنین در مورد کیفیت ابعادی و انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی در قالب‌هایی که از جنس آلیاژ با دمای ذوب پایین ساخته شده‌اند هیچ‌گونه پژوهشی صورت نگرفته است. این تکنیک به تازگی ابداع شده و دارای مزایایی مثل استحکام، ضریب انتقال حرارت بالا، قابلیت استفاده مجدد و درصد انقباض نزدیک به صفر مواد سازنده قالب است. در این پژوهش سعی شده در جهت هر چه بیشتر کاربردی کردن تکنیک‌های ذکرشده در ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک، مقدار انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی از جنس دو پلیمر پلی‌اتیلن و پلی‌استیرن در قالب‌هایی از جنس آلیاژ با دمای ذوب پایین و رزین اپوکسی به دست آورده شود. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف تزریق شامل فشار تزریق، زمان نگهداری فشار و دمای پلیمر مذاب روی انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی در قالب‌های مذکور بررسی شده و مقایسه‌ای روی کیفیت قطعات به دست آمده از دو قالب صورت گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این بخش ابتدا شکل و ابعاد مدل استفاده شده برای ساخت حفره‌های قالب، ارائه شده و سپس ابعاد و مشخصات قالب ساخته شده توسط آن مدل و مشخصات دستگاه تزریق پلاستیک، شرایط تزریق، آزمایش‌های انجام شده و اطلاعات به دست آمده ارائه شده است.

۲-۱- مدل مورد استفاده برای ساخت حفره‌های قالب

در این تحقیق، از یک مدل مکعب مستطیل شکل برای ساخت حفره‌های قالب با شکل و ابعادی که در شکل **۱** مشاهده می‌شود، استفاده شده است. دلیل استفاده از مدلی با این هندسه، بررسی دقیق و آسان اعوجاج‌ها و تغییرات ابعادی قطعه در سه جهت طولی، عرضی و ارتفاع آن است. همچنین جدایش و بیرون‌اندازی راحت قطعه از قالب و ساخت سریع قالب و مدل نیز مد نظر بوده است. برای جدایش بهتر قطعه از قالب در دیواره‌های مدل یک شیب ۷ درجه ایجاد شده است [۸].



شکل (۱): شکل مدل استفاده شده برای ساخت قالب.

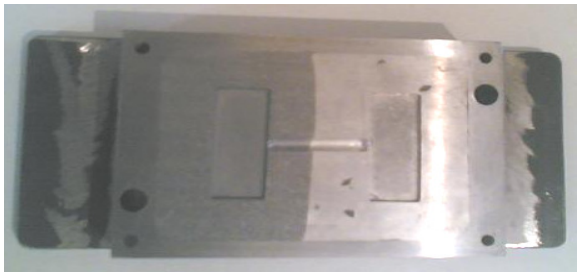
۲-۲- قالب تزریق پلاستیک ساخته شده از روش RT[6]

برای ساخت قالب از یک کلاف فولادی پیش ساخته استفاده شده است. این کلاف به دو قسمت تقسیم شده و هر قسمت با ریخته‌گری مواد سازنده آن بر روی مدل حفره قالب ساخته شده است. این حفره با استفاده از داده‌های تحقیق انجام شده

6- Harris
1- Cheah
2- Chua
3- Polyurethane Mould
4- Rtv Mould
5- Rapid Tooling

www.SID.ir

توسط چن و سودرشان الگوبرداری شده [۱ و ۷] که شکل ظاهری و ابعاد حفره‌های قالب در شکل **۲** نشان داده شده است:



ضخامت(mm)	عرض (mm)	طول (mm)	جنس حفره
۲/۷۷	۱۹/۹۳	۴۹/۶۳	EPOXY
۲/۸۱	۱۹/۹۳	۴۹/۶۳	LMPA

شکل (۲): تصویر شماتیک قالب تزریق پلاستیک به همراه ابعاد حفره‌ها.

با توجه به ابعاد و وزن قطعات، راهگاه نیم دایره‌ای شکل به قطر ۶ mm و دهانه تزریق مستطیل شکل به ابعاد ۳×۰/۵ mm به صورت متقارن در مرکز حفره‌ها ماشین‌کاری شده است. مقطع دهانه تزریق به اندازه‌ای است که باعث مسدود شدن پیش از موعد و قطع جریان مذاب نشود. در این قالب، برای بررسی دقیق‌تر تأثیر انتقال حرارت مواد سازنده قالب روی انقباض ایجاد شده در قطعات، از سیستم خنک‌کاری استفاده نشده است. همچنین قالب‌ها دارای سیستم پران نمی‌باشند، وجود پین‌های پران فولادی باعث اشغال سطحی از حفره قالب شده که این موضوع باعث خنک‌کاری پلیمر تزریقی با نرخ‌های متفاوت نسبت به دیگر نقاط حفره می‌شود. نبود سیستم پران به دلیل شکل ساده قطعات و خروج راحت آنها از قالب مشکل خاصی به وجود نمی‌آورد. لازم به ذکر است که ضریب انتقال حرارت آلیاژ MCP ۱۵۰ و رزین اپوکسی به ترتیب ۳۰ و ۰/۳ W/m K است.

۲-۳- تزریق پلاستیک

در این تحقیق برای ساده‌سازی، بعضی از پارامترهای آزمایشگاهی حذف شده و مقایسه‌ای از نظر ابعادی، کیفیت قطعه و زمان سیکل تزریق بین قطعات تزریق شده در دو اینسرت از جنس رزین اپوکسی و آلیاژ MCP۱۵۰ صورت گرفته است. همچنین از دو نوع پلیمر پلی‌اتیلن و پلی‌استیرن استفاده شده که به ترتیب دارای ساختار کریستالی و آمورف بوده و در مقاله حاضر با علائم اختصاری PE[1] و PS[2] از آنها نام برده می‌شود.

برای تزریق قطعات از یک دستگاه تزریق پلاستیک با نیروی کلمپینگ ۷۰ تن استفاده شده که تصویر آن در شکل **۳** مشاهده می‌شود.

شکل (۳): دستگاه تزریق پلاستیک مورد استفاده در تحقیق حاضر.

همچنین تنظیم‌های اولیه دستگاه برای تزریق قطعات به شرح زیر است:

- درجه حرارت مذاب برابر با ۲۴۰ ° C است،
- سرعت تزریق ۱۰۰ mm/sec در نظر گرفته شده است،
- فشار تزریق برابر با ۵۰۰ bar است،
- فشار ثانویه ۵۰۰ bar و برای مدت ۳ ثانیه پس از تزریق نگهداشته می‌شود،
- دمای اولیه قالب قبل از تزریق ۲۳/۵ ° C است و
- زمان خنک‌کاری ۶۰ ثانیه قبل از اینکه قطعه از قالب خارج شود در نظر گرفته شده، این زمان به مقداری است که قطعه بدون خرابی و با دمای کمتر از ۵۰ ° C از قالب خارج شود.

با توجه به تنظیماتی که در بالا برای دستگاه تزریق بیان شد، برای دو نوع پلیمر PE و PS تعداد ۱۰ قطعه در شرایط یکسان تزریق شده که در شکل **۴** تعدادی از این قطعات نشان داده شده است. قطعات تزریق شده در محیط آزمایشگاه و دمای ۲۵ ° C نگهداری شده و پس از ۴۸ ساعت به وسیله یک میکرومتر با دقت ±۰/۰۱ از سه ناحیه طول، عرض و ارتفاع اندازه‌گیری شده‌اند [۹].

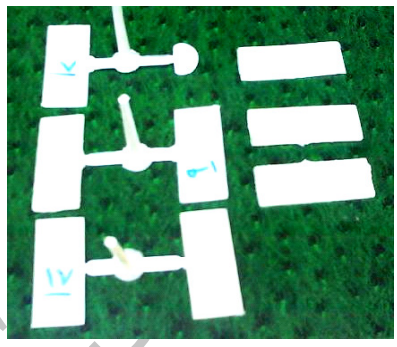
1- Polyethylene
2- Polystyrene

Archive of SID

www.SID.ir

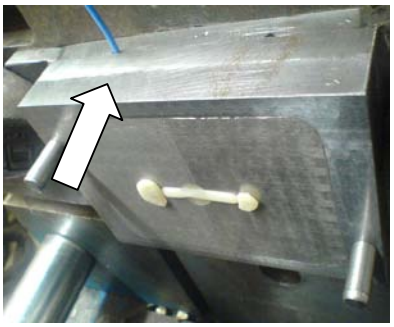
۲-۴- اندازه‌گیری دمای قطعات در حین سیکل قالب‌گیری

با استفاده از ترموکوپل‌هایی که سنسور آنها توسط سوراخ‌هایی در فاصله ۰/۵ میلی‌متری زیر سطح حفره قالب قرار داده شده، دمای قطعات از ابتدای تزریق تا خروج آنها از قالب اندازه‌گیری شده است. تصویر این ترموکوپل و محل ورود سنسور، در شکل‌های **۵** و **۶** نشان داده شده است.



شکل (۴): تصویر قطعات پلاستیکی.

شکل (۵): ترموکوپل استفاده شده برای تعیین دمای قطعات از تزریق تا خروج از قالب.



شکل (۶): محل ورود سنسور ترموکوپل به قالب برای اندازه‌گیری دمای پلیمر.

۲- ۵- تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر روی انقباض ایجاد شده در قطعات

از دیگر عوامل مؤثر بر انقباض قطعات پلاستیکی تزریق شده می‌توان به جنس پلیمر مصرفی، فشار تزریق، زمان نگهداری فشار پس از تزریق، دمای مذاب، سیستم خنک‌کاری قالب و شکل هندسی قطعه اشاره نمود. در ادامه با انجام آزمایش‌هایی به بررسی تأثیر سه پارامتر فشار تزریق، زمان نگهداری فشار و دمای مذاب بر روی انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی از جنس پلیمر PE در دو قالب پرداخته شده است. در هر آزمایش، انقباض فقط در جهت طولی قطعات اندازه‌گیری شده است (به دلیل بزرگ‌تر بودن و تأثیر بیشتر انقباض در این جهت). در هر مرحله از آزمایش‌ها ۳ قطعه تزریق شده و نتایج از محاسبه میانگین ابعاد این ۳ قطعه پس از گذشت ۴۸ ساعت از تزریق، ارائه شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری در شرایط آزمایشگاهی و با دقت ۰/۰۱± میلی‌متر صورت گرفته است.

آزمایش تأثیر تغییرات فشار تزریق بر انقباض قطعات: در این آزمایش که تنها بر روی پلیمر PE با ساختار کریستالی انجام شده، پلیمر مذاب با همان تنظیمات قبلی دستگاه در دما و زمان نگهداری فشار ثابت، با تغییر فشار در پنج رنج ۵۰۰، ۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ بار در قالب تزریق شده است. در هر فشار، حداقل سه قطعه در هر حفره تزریق شده و نتایج از میانگین اندازه‌های آنها به دست آمده که در بخش بحث و بررسی نتایج توضیح داده می‌شود.

آزمایش تأثیر زمان نگهداری فشار روی انقباض: این آزمایش نیز تنها بر روی پلیمر PE با ساختار کریستالی انجام شده است. پلیمر مذاب با همان تنظیمات اولیه دستگاه در فشار و دمای مذاب ثابت با تغییر زمان نگهداری فشار تزریق در پنج رنج ۳، ۵، ۷، ۸ و ۱۰ ثانیه در قالب تزریق شده است.

آزمایش تأثیر افزایش دمای مذاب روی انقباض: این آزمایش نیز تنها بر روی پلیمر PE با ساختار کریستالی انجام شده است. پلیمر با همان تنظیمات اولیه دستگاه در فشار و زمان ثابت، فقط با تغییر دمای پلیمر مذاب در پنج رنج ۲۲۰، ۲۳۰، ۲۴۰، ۲۵۰ و ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد در قالب تزریق شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

۳- بحث و بررسی نتایج

در ادامه به بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته پرداخته شده است.

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایش تزریق قطعات از دو جنس PE و PS

در این قسمت، انقباض به وجود آمده در قطعات تزریق شده از دو پلیمر کریستالی و بی‌شکل PE و PS در دو حفره رزینی و آلیاژ با دمای ذوب پایین در جدول‌های **۱** و**۲** نشان داده شده است. با گذشت زمان از تزریق قطعات تغییر ابعادی بر اثر تغییرات دما و به ویژه بر اثر بهسازی تکمیلی ساختار کریستالی پلیمر اتفاق می‌افتد. این تغییرات بر اثر آزاد شدن تنش‌های پسماند، سمت‌گیری مجدد و کریستالیزاسیون بعدی در مواد بلوری ایجاد می‌شوند. در مواد غیربلوری، این تغییرات کوچک و قابل چشم پوشی است. در تکنیک قالب‌گیری تزریقی، انقباض برابر با نسبت اختلاف بین یک اندازه دلخواه در حفره قالب و اندازه مربوطه در قطعه قالب‌گیری به اندازه حفره قالب است.

همان‌طور که در جدول **۱** دیده می‌شود درصد انقباض ایجاد شده در قطعات پلی‌اتیلنی که در حفره از جنس آلیاژ با دمای ذوب پایین تزریق شده‌اند نسبت به قطعات تزریقی در حفره رزینی در راستای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب به مقدار ۰/۶۲ ، ۰/۴۶ و ۰/۷۵ درصد کاهش یافته است.

با توجه به شرایط کاملاً یکسان تزریق پلیمر در دو حفره، تنها عامل این اختلاف انقباض، تفاوت ضریب هدایت حرارتی مواد تشکیل دهنده دو اینسرت است. به دلیل بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت آلیاژ با دمای ذوب پایین MCP۱۵۰، انقباض ایجاد شده در قطعات تزریق شده در اینسرت آن کمتر است. نرخ خنک‌کاری بر روی انقباض ایجاد شده در پلیمرهای با ساختار کریستالی بسیار مؤثر است، به این دلیل که زنجیر های پلیمری در حالت مذاب به صورت آشفته هستند (از دیدگاه ساختار کریستالی) و چنانچه در همین حالت به سرعت جامد شوند دارای ساختار متراکم و بی‌نظمی می‌شوند. در صورتی که پلیمر مذاب با روند کندتری جامد شود زنجیرهای پلیمرهای با ساختار کریستالی فرصت کافی برای تبلور و تشکیل ساختار کریستالی منظم را به دست آورده و در نتیجه چگالی و انقباض ساختار افزایش می‌یابد [۱۰]. قطعات تزریقی در هر دو حفره در جهات مختلف مقادیر انقباض متفاوتی دارند، زیرا تنش‌های پسماند متفاوتی در اثر جهت جریان مذاب در داخل حفره‌ها ایجاد می‌شود.

در جدول **۲** مقدار انقباض ایجاد شده در قطعات از جنس PS که در دو حفره رزینی و آلیاژ زود ذوب تزریق شده‌اند نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار انقباض ایجاد شده در این قطعات نسبت به قطعات از جنس PE بسیار پایین بوده و به طور تقریبی انقباض ایجاد شده در قطعات از جنس PS در دو اینسرت رزینی و آلیاژ زود ذوب با یکدیگر برابر هستند. این مسئله نشان می‌دهد که جنس‌های متفاوت حفره‌ها و در نتیجه ضریب هدایت حرارتی متفاوت، تأثیری بر روی انقباض ایجاد شده در قطعات از جنس پلیمر PS که از نوع پلیمرهای آمورف و فاقد شبکه کریستالی می‌باشد ندارد.

جدول (۱): میانگین و اختلاف ابعاد قطعات با اینسرت‌ها و درصد انقباض برای قطعات از جنس PE.

متغیر ها	طول	عرض	ارتفاع
اندازه اینسرت LMPA	۴۹/۶۳	۱۹/۹۳	۲/۸۱
میانگین اندازه قطعات تزریق شده در اینسرت LMPA	۴۸/۶۲	۱۹/۴۵	۲/۷۴
میانگین اختلاف اندازه قطعات با اینسرت LMPA	۱/۰۱	۰/۴۸	۰/۰۷
درصد انقباض قطعات تزریق شده در اینسرت LMPA	۲/۰۳	۲/۴	۲/۴۹
اندازه اینسرت رزینی	۴۹/۶۳	۱۹/۹۳	۲/۷۷
میانگین اندازه قطعات تزریق شده در اینسرت رزینی	۴۸/۳۱	۱۹/۳۶	۲/۶۸
میانگین اختلاف اندازه قطعات با حفره رزینی	۱/۳۲	۰/۵۷	۰/۰۹
درصد انقباض قطعات تزریق شده در حفره رزینی	۲/۶۵	۲/۸۶	۳/۲۴

جدول (۲): میانگین و اختلاف ابعاد قطعات با حفره‌ها و درصد انقباض برای قطعات از جنس PS.

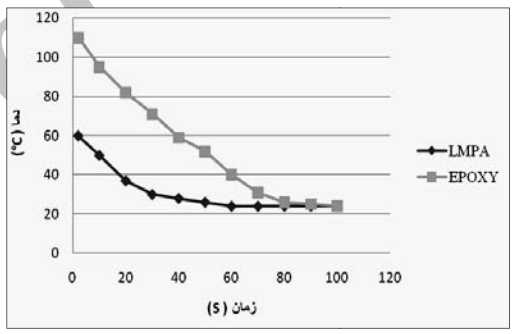
متغیر ها	طول	عرض	ارتفاع
اندازه اینسرت LMPA	۴۹/۶۳	۱۹/۹۳	۲/۸۱
میانگین اندازه قطعات تزریق شده در اینسرت LMPA	۴۹/۴۸	۱۹/۹۱	۲/۷۹
میانگین اختلاف اندازه قطعات با اینسرت LMPA	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۰۲
درصد انقباض قطعات تزریق شده در اینسرت LMPA	۰/۳	۰/۱	۰/۷۱
اندازه اینسرت رزینی	۴۹/۶۳	۱۹/۹۳	۲/۸
میانگین اندازه قطعات تزریق شده در اینسرت رزینی	۴۹/۵۱	۱۹/۹۰	۲/۷۹
میانگین اختلاف اندازه قطعات با حفره رزینی	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۱
درصد انقباض قطعات تزریق شده در حفره رزینی	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۳۵

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲- تحلیل نتایج اندازه‌گیری دمای قطعات درون قالب

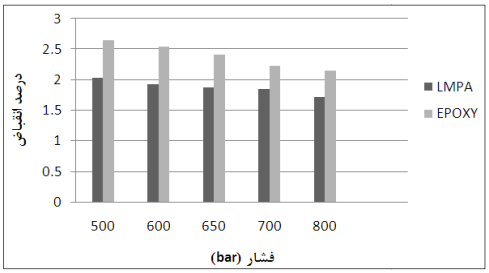
دمای قطعات پس از تزریق به وسیله ترموکوپلی تا خنک شدن کامل در دو حفره رزینی و آلیاژ زود ذوب اندازه‌گیری و در نمودار شکل **۷** نشان داده شده است. دمای مذاب هنگام تزریق ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد بوده که بلافاصله پس از ورود به اسپرو بوش قالب به شدت افت کرده و همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود پس از ۲ ثانیه دمای پلیمر PE در اینسرت رزینی حدود ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و در اینسرت آلیاژ با دمای ذوب پایین به حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و از این پس با روند تقریبی یکنواختی سرد شده‌اند. اگر دمای خروج قطعه از قالب ۵۰ درجه در نظر گرفته شود، قطعه در حفره رزینی پس از ۵۰ ثانیه و در حفره از جنس آلیاژ زود ذوب پس از ۱۰ ثانیه بعد از اتمام تزریق به این دما می‌رسد. با تزریق قطعات در قالب از جنس آلیاژ با دمای ذوب پایین زمان تولید هر قطعه به مدت ۴۰ ثانیه کاهش یافته که در هزینه تمام شده قطعه بسیار مؤثر است.



شکل (۷): نمودار دمایی قطعات تزریقی در دو اینسرت رزینی و LMPA از ابتدای تزریق تا خروج قطعه از قالب.

۳-۳- تحلیل نتایج آزمایش تغییرات فشار تزریق بر روی انقباض قطعات

همان‌طور که در نمودار شکل **۸** دیده می‌شود، درصد انقباض قطعات تزریق شده در هر دو حفره با افزایش فشار تزریق کاهش می‌یابد، زیرا مواد پلاستیکی ضریب انبساط حرارتی مثبت دارند و در حالت مذاب تراکم پذیر می‌باشند. همچنین جرم یک حجم ثابت در پلاستیک‌ها با دما و فشار تغییر می‌کند. در این آزمایش نیز با افزایش فشار، مقدار پلیمر بیشتری وارد حفره‌ها شده و مقدار انقباض را کاهش داده است [۱۰]. کمترین مقدار انقباض قطعات حفره رزینی بیشتر از بیشترین مقدار انقباض قطعات حفره LMPA می‌باشد.



شکل (۸): نمودار تأثیر تغییرات فشار بر انقباض قطعات تزریق شده در دو حفره.

۳-۴- تحلیل نتایج آزمایش زمان نگهداری فشار بر روی انقباض قطعات

به دلیل اینکه پلاستیک‌ها تراکم پذیر می‌باشند، افزایش زمان نگهداری فشار (بعد از پر شدن حفره قالب) بر روی مقدار انقباض قطعات مؤثر است. زمان نگهداری فشار به طراحی و ابعاد دروازه ورودی مواد به حفره (گیت) و سیستم راهگاهی قالب بستگی دارد. نگهداری فشار بعد از منجمد شدن دروازه تزریق و سیستم راهگاهی بی‌فایده است. با افزایش زمان نگهداری فشار روی حفره قالب، جرم بیشتری از پلاستیک در این حفره وارد شده و انقباض قطعات قالب‌گیری شده کاهش می‌یابد [۱۰]. نتایج به دست آمده از افزایش زمان نگهداری فشار تزریق بر انقباض قطعات برای دو حفره رزینی و آلیاژ با دمای ذوب پایین MCP۱۵۰ در نمودار شکل **۹** نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، تأثیر افزایش زمان نگهداری فشار تزریق بر روی انقباض ایجاد شده در قطعاتی که در حفره LMPA تزریق شده‌اند بسیار ناچیز است زیرا در این حفره قالب دمای پلیمر مذاب به شدت کاهش یافته و در زمان اندکی دهانه تزریق مسدود می‌شود. اما در حفره رزینی به دلیل سرعت پایین خنک‌کاری انجماد و مسدود شدن دهانه تزریق دیرتر اتفاق می‌افتد و با افزایش زمان نگهداری فشار، پلیمر مدت زمان بیشتری تحت فشار قرار گرفته و انقباض ایجاد شده در قطعه نهایی با نرخ بالایی کاهش می‌یابد.

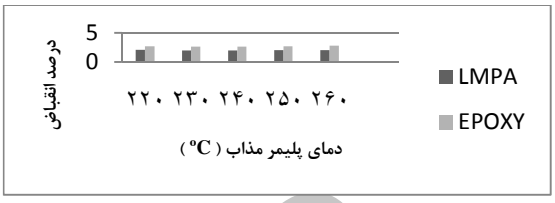
شکل (۹): نمودارهای تأثیر زمان نگهداری فشار بر درصد انقباض قطعات تزریق شده در دو قالب از جنس رزین و LMPA.

Archive of SID

www.SID.ir

۳- ۵- تحلیل نتایج آزمایش تأثیر تغییرات دمای پلیمر مذاب بر روی انقباض قطعات

نتایج آزمایش تأثیر تغییرات دمای پلیمر مذاب روی انقباض قطعاتی که در دو اینسرت رزینی و LMPA تزریق شده‌اند در شکل **۱۰** نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نمودار تأثیر دمای پلیمر مذاب بر روی انقباض قطعات در قالب‌های از جنس LMPA و رزین.

درصد انقباض در هر دو دمای بالا و پایین مذاب، بالا است. در دمای مذاب پایین، پلیمر مذاب حفره قالب را قبل از اینکه دروازه آن بسته شود پر می‌کند. به دلیل پایین بودن دمای مذاب، افت فشار از دهانه تزریق تا انتهای قطعه بالا بوده و زمان مؤثری جهت متراکم کردن پلیمر داخل حفره وجود ندارد. فشار در انتهای جریان کم است بنابر این انقباض این نواحی زیاد است. در دمای مذاب بالا قبل از اینکه دهانه تزریق حفره منجمد شود ممکن است زمان نگهداری فشار به پایان رسیده و به دلیل نبود فشار بر روی حفره، انقباض ایجاد شده در قطعه افزایش یابد. در صورتی که اگر بین این عوامل تعادلی بر قرار شود انقباض حاصل از دمای مذاب به حداقل می‌رسد [۱۰].

۴- نتیجه‌گیری

انقباض ایجاد شده در قطعات تزریقی در حفره LMPA برای پلیمر PE ۲/۴۹ تا ۲/۰۳ درصد و در قالب رزینی ۳/۲۴ تا ۲/۶۵ درصد است. به دلیل سرعت بیشتر سرد شدن قطعه در حفره LMPA، انقباض کمتری در قطعات تزریق شده در آن ایجاد شده است. انقباض قطعات تزریقی از جنس پلیمر آمورف PS در دو حفره در حدود ۰/۷۱ تا ۰/۱ درصد بوده و انتقال حرارت‌های متفاوت حفره‌ها تأثیر چندانی بر روی انقباض قطعات از جنس PS ندارد.

- خنک‌کاری قطعاتی که در حفره از جنس LMPA تزریق شده در حدود ۱۰ ثانیه و قطعاتی که در حفره رزینی تزریق شده‌اند در حدود ۵۰ ثانیه است، این زمان برای حفره‌های از جنس فولاد در حدود ۴ ثانیه می‌باشد. ۴۰ ثانیه اختلاف بین زمان خنک‌کاری در حفره‌های رزینی و LMPA باعث کاهش چشمگیر هزینه تولید و درصد انقباض قطعات پلاستیکی تزریق شده در آن شده است،

- افزایش فشار تزریق انقباض قطعات تزریقی در دو حفره را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و مقدار آن را در جهت عمود بر جریان مذاب در قطعات حفره LMPA به ٪ ۱/۷۱ و در حفره رزینی به ٪ ۲/۱۵ رسانده است،

- افزایش زمان نگهداری فشار پس از تزریق در حفره رزینی کاهش چشمگیری در انقباض به وجود آورده و مقدار آن را به ٪ ۱/۶۳ در ۱۰ ثانیه نگهداری فشار رسانده است، ولی در حفره LMPA به دلیل سرعت بالاتر سرد شدن قطعه و مسدود شدن دهانه تزریق، افزایش زمان نگهداری فشار بر روی درصد انقباض قطعه بی‌تأثیر است و

- افزایش دمای پلیمر مذاب به دلیل مسدود نشدن دهانه تزریق و اتمام زمان نگهداری فشار و همچنین شرایط مساعدتر برای تبلور و تشکیل ساختار کریستالی منظم، باعث افزایش درصد انقباض در قطعات تزریقی در دو حفره شده است.

۵- مراجع

1. Sudershan, J. And Daniel, K. "A Rapid Tooling Technique Using a Low Melting Point Metal Alloy for Plastic Injection Molding", J. of Industrial Tech., Vol. 22, No. 3, pp. 65, 2006.
2. Velarde, D.A. and Yeagley, M.J. "Linear Shrinkage Differences in Injection Moulded Parts", Plastics Engineering, the Society of Plastics Engineers, Vol. 52, No. 5, pp. 60–64, 2000.
3. Patel, P. "Effect of Processing Conditions on the Shrinkage and Crystallinity of Injection Molded Parts", Proc. of the Society of Plastics Engineers (SPE) Annual Tech. Conf. (ANTEC), Toronto, Canada, Vol. 41, No. 6, pp. 3632–3635, 1997.
4. Pierick, D. and Noller, R. "The Effect of Processing Condition on Shrinkage", Proc. of the Society of Plastics Engineers (SPE) Annual Tech.Conf. (ANTEC), Montreal, Canada, Vol. 32, No. 6, pp. 252–253, 1991.
5. Harris, R.A., Newlyn, H.A., Hague, R.J.M., and Dickens, P.M. "Part Shrinkage Anomilies from Stereolithography Injection Mould Tooling", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 2, pp. 879–887, 2003.
6. Harris, R.A. Hague, R.J.M., and Dickens, P.M. "The Structure of Parts Production by Stereolithograpy Injection Mould Tools and the Effect on Part Shrinkage", nt. J. Of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 4, pp. 59-64, 2004.
7. Cheah, C. M., Chua, C. K., and Ong, H. S. "Rapid Moulding Using Epoxy Tooling Resin", Int. J. Adv Manuf Tech., Vol. 20, No. 9, pp. 368–374, 2002.
8. Ding,Y., Lan, H., Hong, J., and Wu, D. "An Integrated Manufacturing System for Rapid Tooling Based on Rapid Prototyping", Robotic and Computer-Integrated, Manufacturing, Vol. 20, No. 5, pp. 281–288, 2004.
9. BS EN ISO 291. Plastics Standard Atmospheres for Conditioning and Testing, British Standards Institution, ISBN 0 580 28585 5, 1997.
10. Jerry, M. and Fischer, G "Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage", Plastics Design Library, 2003.

Archive of SID

www.SID.ir