

قالبگیری تزریقی پیوسته اسفنج ساختاری گرمانرم

Continuous Injection Molding of Thermoplastic Structural Foam

امیرحسین بحری^۱، محمد حسین نوید فامیلی*^۲، ناصر محمدی^۲

۱- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۱۱

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۵۸۱۷۵/۴۴۱۳

دریافت: ۸۱/۵/۱۳، پذیرش: ۸۲/۲/۱۰

چکیده

در این مقاله روشی جدید برای قالبگیری تزریقی اسفنج ساختاری گرمانرم با استفاده از عامل پفزای شیمیایی بطور پیوسته ارائه شده است. در اکثر فرایندهای تولید اسفنج به کمک عامل پفزای شیمیایی، دانه یا پودر پلیمر پیش از فرایند شکل دهی با عامل پفزای شیمیایی بطور ایستا مخلوط می شود که عموماً اختلاط خوبی را نتیجه نمی دهد. در این پژوهش از یک اکسترودر دومارپیچی نا همسوگرد به همراه دو تغذیه کننده برای اختلاط عامل پفزا با پلیمر و از یک دستگاه تزریق عمودی پیستونی برای تزریق اسفنج به داخل قالب استفاده شده است. دو روش کم فشار و فشار گاز متقابل برای ساخت اسفنج ساختاری مرسوم است. ضعف عمده اسفنجهای ساختاری تهیه شده به روش کم فشار، زبری سطح آنهاست که این ضعف در روش فشار گاز متقابل قابل رفع است. در این مطالعه، دو روش کم فشار و فشار گاز متقابل بررسی شده و کیفیت سطح نمونه های ساخته شده به دو روش مزبور با یکدیگر مقایسه شده است.

واژه های کلیدی

اسفنجهای ساختاری گرمانرم،
اکسترودر دو مارپیچی،
قالبگیری تزریقی پیوسته،
فشار گاز متقابل، کم فشار

مقدمه

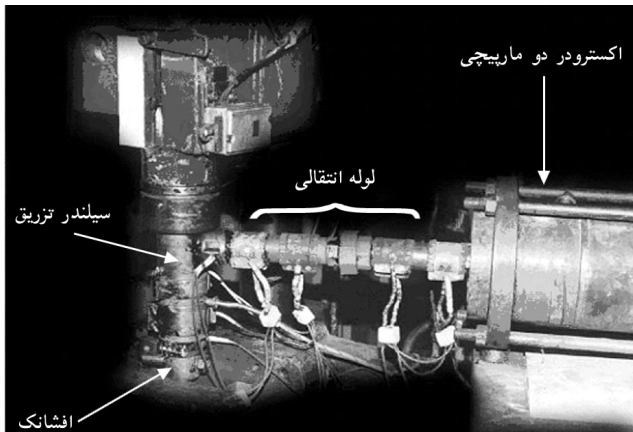
گونه قطعات در مقایسه با مشابه غیر اسفنجی آنها در نسبت سفتی به وزن بالا، عدم وجود تنشهای باقیمانده در قطعه، نبود تاب خوردگی در قطعه های بزرگ و نبود علائم فرورفتگی در قطعه های ضخیم است [۱].

اسفنجهای ساختاری به دلیل ساختار

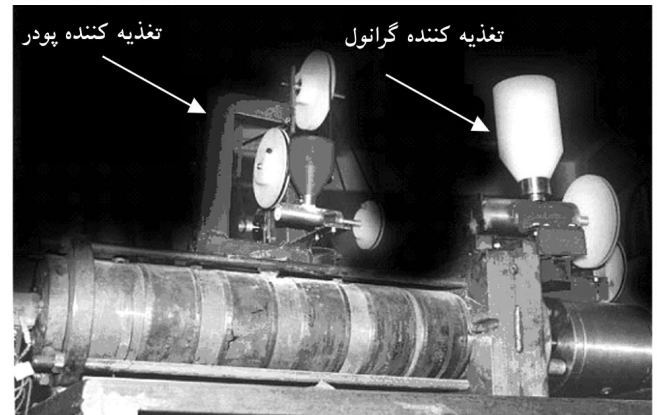
در دسته بندی اسفنجهای پلیمری (گرمانرم یا گرماسخت) به موادی اسفنجهای ساختاری می گویند که پوسته خارجی آنها بدون حباب و هسته مرکزی آنها به صورت اسفنج است [۱]. این گونه اسفنجها می توانند تک جزئی، چند جزئی، گرمانرم یا گرماسخت باشند. مزیت عمده این

Key Words

thermoplastic structural foams,
twin screw extruder,
continuous injection molding,
gas counter pressure, low pressure



شکل ۲- نمایی از اتصال اکسترودر به سیلندر تزریق.



شکل ۱- نمایی از تغذیه کننده های نصب شده روی اکسترودر.

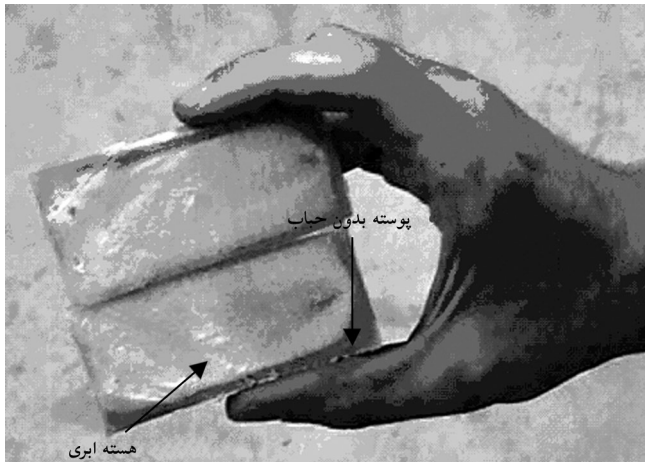
شده و اسفنجی شدن قطعه آغاز می شود. در اثر فشار اسفنجی شدن، ماده قالب را پر می کند. در حالت دوم پلیمر اسفنج شدنی بطور کامل قالب را پر می کند، اما در پیچه قالب طوری طراحی می شود که ماده اضافه بر گنجایش حفره که از اسفنجی شدن قطعه بوجود می آید از قالب خارج و وارد سیلندر تزریق یا اکسترودر شود. ضخامت پوسته و چگالی کلی قطعه بستگی به زمان برداشته شدن فشار متقابل دارد.

در هریک از سه روش قالبگیری تزریقی یاد شده برای تزریق قطعه های کوچک از یک اکسترودر دارای پیچ با حرکت معکوس (reciprocating screw extruder) استفاده می شود و برای تزریق قطعه های بزرگ از یک اکسترودر که یک سیلندر تزریق مجزا به آن وصل شده است استفاده می شود [۵]. برای اسفنجی کردن پلیمر نیز می توان از عامل پفزای شیمیایی، عامل پفزای فیزیکی یا تزریق گاز خنثی به داخل مذاب در حین فرایند استفاده کرد.

در اکثر فرایندهای قالبگیری اسفنجها (چه ساختاری و چه معمولی) که از عامل پفزای شیمیایی استفاده می شود، دانه یا پودر پلیمر پیش از انجام عمل اکستروژن و سپس تزریق، با عامل پفزا در یک مخلوط کن ایستا مخلوط می شود. در این مخلوط کنهای ایستا یا پلیمر ذوب شده و در دمای پایینتر از دمای تخریب عامل پفزا با آن مخلوط می شود مانند اختلاط در بنبوری [۶] یا به صورت جامد در مخلوط کن خشک با عامل پفزا به مدت دو ساعت مخلوط می شود [۷، ۹، ۱۲]. در هر دو روش، اختلاط خوبی نسبت به مخلوط کنهای پیوسته بدست نمی آید. به علاوه، زمان تولید در این روشها به دلیل چند مرحله ای بودن آنها طولانی است. به همین دلیل برای رسیدن به یک اختلاط خوب و نیز کاهش زمان تولید حالت ایده آل استفاده از مخلوط کنهای پیوسته مانند اکسترودر دو ماریچی است که عامل پفزای شیمیایی در حین فرایند ذوب پلیمر به آن افزوده شود.

ویژه ای که دارند کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از قبیل خودرو، کشاورزی، دفاع، لوازم خانگی، مبلمان اداری و ساختمان پیدا کرده اند. اسفنجهای ساختاری تک جزئی به دوروش اکستروژن و قالبگیری تهیه می شوند که روش قالبگیری تزریقی مرسوم تر از سایر روشهاست. روش قالبگیری تزریقی خود به سه روش تقسیم می شود که عبارتند از: کم فشار، پرفشار و فشار گاز متقابل [۳، ۴].

در روش کم فشار مقدار مخلوط پلیمر و گاز تولید شده کمتر از گنجایش محفظه قالب به صورت کم ضرب (short shot) به درون قالب تزریق می شود و اسفنجی شدن به دلیل افت فشار در داخل قالب صورت می گیرد و بقیه قالب از ماده اسفنجی پر می شود. ضعف عمده این روش زبری سطح قطعه است که ناشی از گسیختگی سلولها روی سطح است. در روش پرفشار، پلیمر اسفنج شدنی به داخل حفره قالب طوری تزریق می شود که آن را کاملاً پر می کند (بسیار شبیه به قالبگیری تزریقی معمولی)، اما حجم حفره در ابتدا کوچکتر از قطعه نهایی است. سپس، مذاب در فشار زیاد قرار می گیرد تا سلولهای تشکیل شده در حین پر شدن قالب را فشرده کند. پس از یک تاخیر به اندازه ای که به لایه سطحی ماده برای سرد شدن و تشکیل پوسته بدون حباب فرصت داده شود، حجم سرتاسری قالب منبسط می شود. با برداشته شدن فشار، اسفنج شدن ماده در هسته باعث پر شدن قالب می شود. ضعف عمده این روش پیچیدگی طراحی قالب آن است و نیز اینکه فقط اجسام با اشکال هندسی ساده را می توان با آن تهیه کرد. به همین دلیل این روش زیاد مرسوم نیست. در روش فشار گاز متقابل قالب پیش از ورود مذاب به داخل آن زیر فشار گاز قرار می گیرد تا از اسفنجی شدن زود هنگام پلیمر جلوگیری شود. این کار باعث بهبود کیفیت سطح قطعه و از بین رفتن گسیختگی سلول در سطح آن می شود. روش فشار گاز متقابل به دو شکل انجام می گیرد. در حالت اول پلیمر اسفنج شدنی بطور کم ضرب وارد قالب زیر فشار می شود. پس از پایان تزریق فشار متقابل برداشته



شکل ۵- برش طولی نمونه تهیه شده از آزمایش اول.

جرم مولکولی ۱۹۲g و خلوص بالای ۹۷ درصد و دمای واکنش ۲۱۰-۱۶۰°C نیز استفاده شده است.

دستگاهها

در این پژوهش، از یک اکسترودر دو ماریپیچی از نوع ناهمسوگرد مزدوج کاملاً درگیر ساخت دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به عنوان مخلوط کن پیوسته استفاده شده است که پلیمر در آن طی ذوب با عامل پفزا مخلوط شده و به کمک یک لوله انتقالی به داخل سیلندر تزریق هدایت می شود. در ابتدا فرایند کم فشار با این طراحی آزمایش شده و سپس فرایند فشار گاز متقابل برای مقایسه با روش کم فشار بررسی شده است. همچنین، از میکروسکوپ نوری مدل Olympus برای بررسی سطح اسفنجها استفاده شده است.

روشها

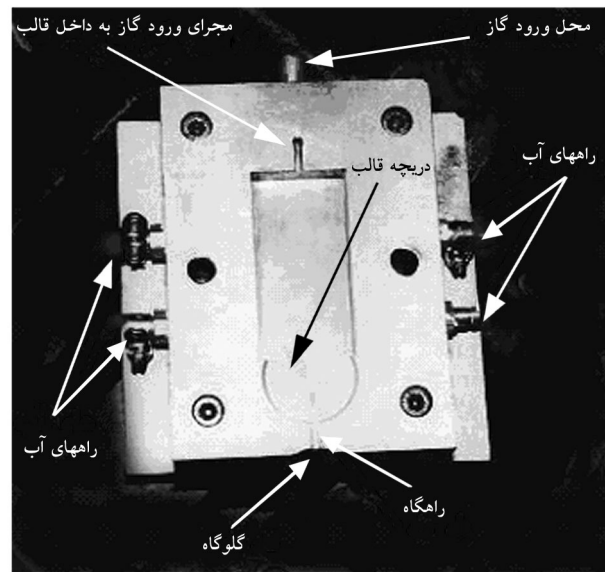
طراحی فرایند

فرایند طراحی شده شامل قسمتهای زیر است:

- اکسترودر دو ماریپیچی،
- تغذیه کننده ها،
- دستگاه تزریق عمودی،
- قالب و
- سیستم خط گاز قالب.

اکسترودر دو ماریپیچی

اکسترودر دو ماریپیچی مورد استفاده از نوع ناهمسوگرد مزدوج کاملاً درگیر است. هر یک از ماریپچها دارای سه مدول تغذیه، اختلاط و پمپ است. حالت معمول چیدن این مدولها در اکسترودر به ترتیب تغذیه،

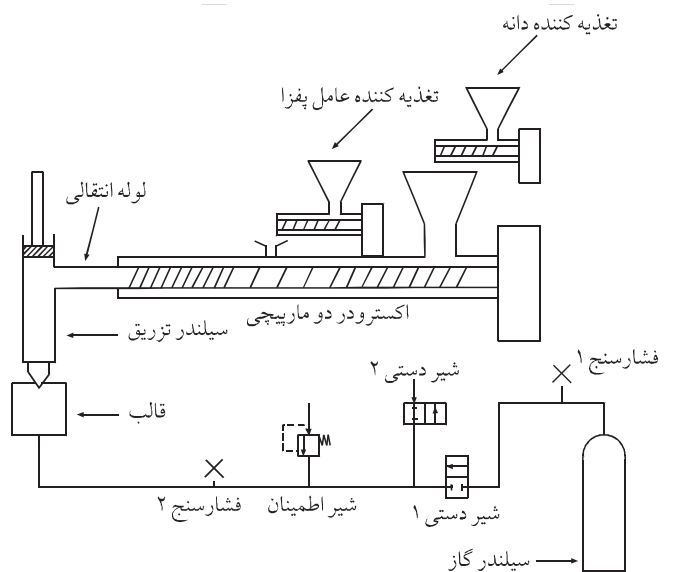


شکل ۳- نمایی از قالب.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از پلی اتیلن سبک تولید شرکت پتروشیمی بندر امام با کد LF ۰۲۰۰ استفاده شده که برای ساخت کیسه، کابل، الیاف و غیره بکار می رود. همچنین، از آزودی کربن آمید با جرم مولکولی ۱۱۶ g و دمای تجزیه ۲۰۴°C و خلوص ۹۷ درصد ساخت شرکت فلوکا و سدیم بی کربنات با جرم مولکولی ۸۴g و دمای تجزیه ۲۱۰-۱۶۰°C و خلوص بالای ۹۷ درصد به عنوان عوامل پفزای شیمیایی و برای تخریب سدیم بی کربنات در دماهای فرایند پلیمر از فعال کننده سیتریک اسید با



شکل ۴- نمایی از فرایند طراحی شده.

فرایند به همراه سیستم خط گاز را نشان می دهد.

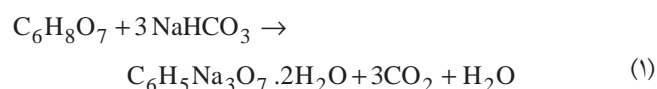
شرح فرایند

پلیمر به صورت دانه از طریق تغذیه کننده وارد اکسترودر دو ماریپیچی شده و در حین ذوب به جلو رانده می شود. با توجه به شکل ۴ عامل پفزا از راه تغذیه کننده مربوط به مذاب افزوده و با آن مخلوط می گردد. در این قسمت دمای اکسترودر طوری تنظیم می شود که دمای مذاب زیر دمای تجزیه عامل پفزا باشد. سپس، در قسمت لوله انتقالی به سیلندر تزریق دمای مذاب به بالای دمای تخریب عامل پفزا می رسد تا در این قسمت گاز لازم برای اسفنج شدن پلیمر تولید شود. سپس، مخلوط پلیمر و مذاب وارد سیلندر تزریق شده و آماده تزریق به داخل قالب می گردد. در این بخش اگر فرایند از نوع کم فشار باشد، سیستم خط گاز هیچ عملی انجام نمی دهد و مذاب به داخل قالب تزریق می شود. ولی، در حالت فرایند فشار گاز متقابل پیش از تزریق مذاب، شیر دستی ۱ باز می شود و قالب زیر فشار مورد نظر قرار می گیرد. فشار قالب به کمک دو فشار سنج نشان داده شده در شکل ۴ کنترل می شود. پس از رسیدن فشار خط به مقدار لازم، ماده به داخل قالب دارای فشار گاز تزریق می شود. در این زمان، به دلیل تزریق ماده به داخل قالب، حجم سیستم خط گاز کاهش می یابد. در نتیجه، فشار از مقدار لازم تجاوز می کند. در این حالت شیر اطمینان تعبیه شده در خط عمل کرده و فشار گاز را به حد مطلوب از پیش تعیین شده می رساند. پس از پایان تزریق شیر دستی ۱ بسته شده و در زمان لازم شیر دستی ۲ برای آزاد ساختن فشار قالب و آغاز اسفنجی شدن باز می شود.

نکته جالب توجه در این فرایند حالت پیوسته آن است. بدین معنی که بر خلاف فرایندهای قابلیگری تزریقی معمولی که هنگام تزریق ماریپیچ اکسترودر از چرخش باز می ایستد، در این فرایند هنگام تزریق مذاب، اکسترودر و تغذیه کننده ها به کار خود ادامه می دهند تا پس از پایان تزریق در مدت زمان خنک شدن قطعه در قالب مقدار ماده لازم برای چرخه جدید آماده شود. دلیل پیوسته بودن فرایند وجود لوله انتقالی بطول ۳۰ cm است که اجازه فشرده شدن پلیمر اسفنجی شده در هنگام تزریق را می دهد.

انجام آزمایش

در ارزیابی اولیه طرح نمونه هایی با عامل پفزی سدیم بی کربنات به علاوه سیتریک اسید به روش کم فشار تهیه شد. یادآوری می شود سیتریک اسید بر مبنای معادله (۱) با سدیم بی کربنات پیش از ورود به تغذیه کننده مخلوط شد.



اختلاط و پمپ است، اما چون در فرایند اسفنجی شدن باید در میانه اکسترودر عامل پفزی شیمیایی به مذاب اضافه شود تا عمل اختلاط در اکسترودر انجام گیرد، با چیدن مدولهای ماریپیچها به روش یاد شده و خوراک دهی کامل اکسترودر امکان اضافه کردن ماده یا موادی در بین راه وجود نخواهد داشت. به همین، دلیل مدولهای ماریپیچ را باید به نحوی پشت سر هم قرار داد که در بخش اضافه کردن ماده (در این مورد عامل پفزی شیمیایی) محفظه ماریپیچ کاملاً پر نباشد و فضای لازم برای ورود ماده به مذاب وجود داشته باشد. در نتیجه، ترتیب مدول اختلاط، تغذیه و پمپ برای این منظور انتخاب شد.

تغذیه کننده ها

یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه اسفنج ساختاری، درصد عامل پفزا است. به همین دلیل کنترل میزان اضافه شدن عامل پفزا در فرایند بسیار حیاتی است. در این پژوهش، برای اضافه کردن عامل پفزی شیمیایی (که به صورت پودر است) به پلیمر در حین حرکت در اکسترودر، یک تغذیه کننده از نوع ماریپیچی طراحی و ساخته شد تا بتوان میزان اضافه شدن عامل پفزا را کنترل کرد. از طرف دیگر، برای ثابت نگه داشتن میزان ورود دانه به داخل اکسترودر نیز یک تغذیه کننده از نوع ماریپیچی برای کنترل این قسمت طراحی و ساخته شد. در شکل ۱ نمایی از تغذیه کننده های نصب شده روی اکسترودر نشان داده شده است.

دستگاه تزریق عمودی

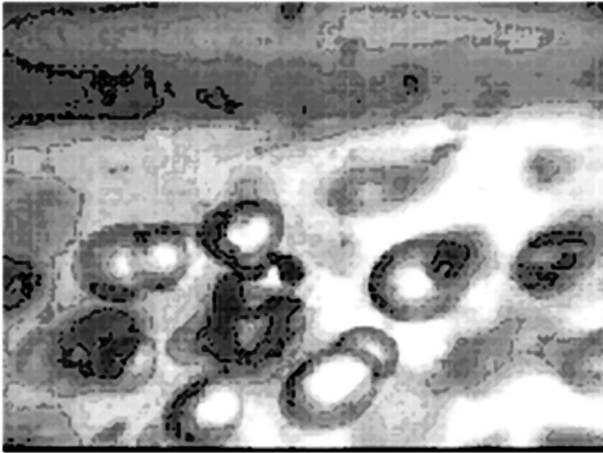
برای تزریق مذاب به داخل قالب از یک دستگاه تزریق پیستونی عمودی استفاده شد که به کمک یک لوله انتقالی به اکسترودر وصل می شود. شکل ۲ نمایی از اکسترودر وصل شده به دستگاه تزریق را نشان داده می دهد. اشاره می شود که برای اتصال اکسترودر به دستگاه تزریق، سیلندر، پیستون و افشانک جدید برای دستگاه تزریق طراحی و ساخته شد.

قالب

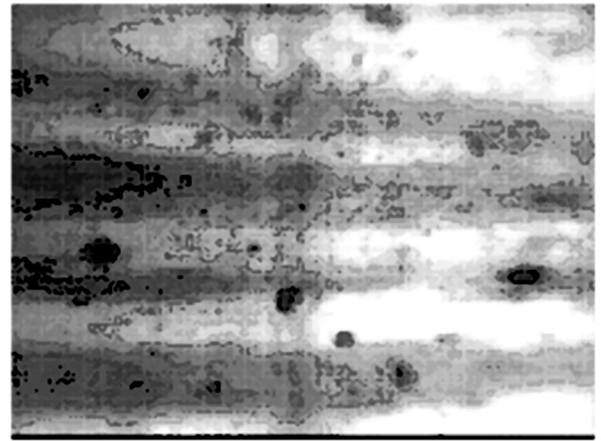
قالب ساخته شده به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۱۵×۴۰×۸۰ mm است که در انتهای قالب مجرایی برای ورود گاز در فرایند فشار گاز متقابل تعبیه شده است. در شکل ۳ نمایی از قالب نشان داده شده است.

سیستم خط گاز قالب

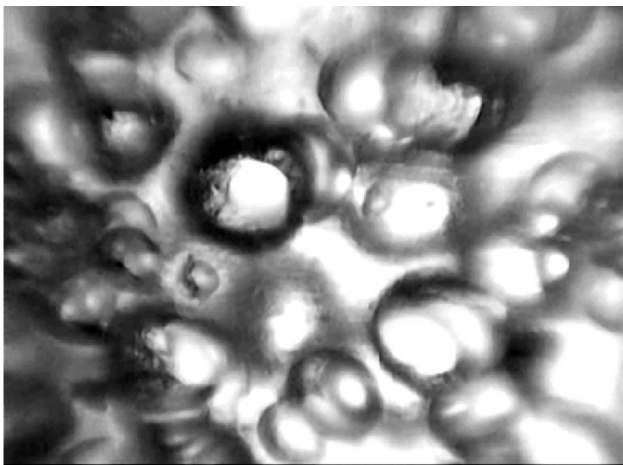
برای فرایند فشار گاز متقابل یک سیستم خط گاز نیتروژن که حداکثر تا فشار ۱۰ بار را تحمل می کند طراحی و ساخته شد. شکل ۴ نمایی از



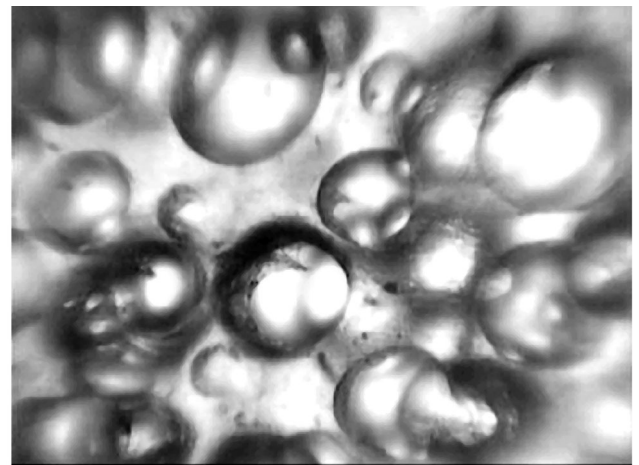
(ب)



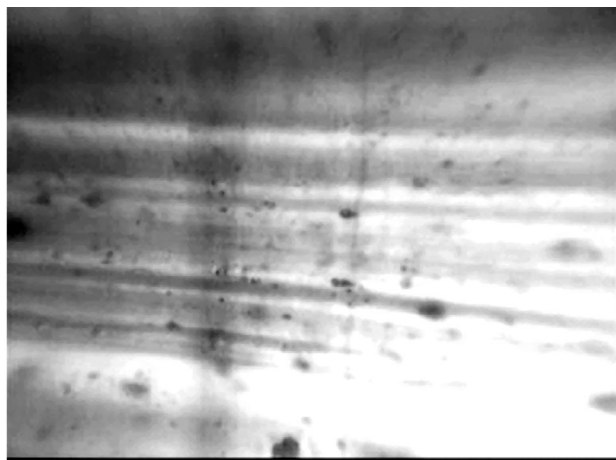
(الف)



(د)



(ج)

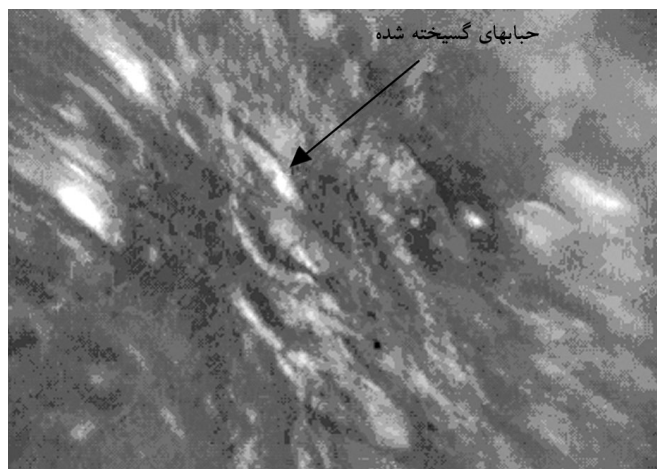


(و)



(ه)

شکل ۶- ریزنگارهای ضخامت نمونه با بزرگنمایی ۵۰ شامل به ترتیب: (الف) پوسته، (ب) ناحیه انتقالی، (ج و د) هسته، (ه) ناحیه انتقالی و (و) پوسته.



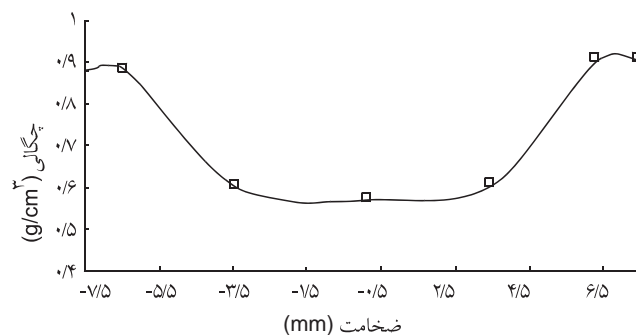
شکل ۸- ریزنگارهای حبابهای گسیخته شده روی سطح قطعه با بزرگنمایی ۵۰

به سمت پوسته تعداد حبابها کاهش یافته که نشان دهنده افزایش چگالی است. این روند در شکل ۷ نیز مشاهده می شود. نیمرخ چگالی دارای سه ناحیه است:

- ۱- ناحیه پوسته که بیشترین چگالی را دارد و چگالی آن نزدیک یا برابر با چگالی پلیمر است،
- ۲- ناحیه هسته که کمترین چگالی را به واسطه بیشترین تعداد حباب دارد و
- ۳- ناحیه انتقالی که دو ناحیه پوسته و هسته را به یکدیگر وصل می کند و دارای چگالی متغیر است.

از طرفی، در نزدیکی پوسته به دلیل شکل جریان مذاب در داخل قالب که به صورت جریان پویسله (Poiseuille flow) است و بالا بودن سرعت برش، حبابها کشیده شده اند. اما هرچه به سمت هسته نزدیک می شویم حبابها کروی تر می شوند و فرض کروی بودن حبابها در مدلسازی رشد حباب صادقتر است. نکته بعدی این است که شکل سلولها در همه نواحی نشان داده شده به صورت بسته است.

مشکل اصلی در ظاهر قطعه، سطح زیر آن است که ناشی از باقی ماندن تعدادی حباب روی سطح پلیمر یا همان گسیختگی حبابها روی سطح است. علت بروز چنین پدیده ای می تواند اسفنجی شدن



شکل ۷- نیمرخ چگالی نمونه آزمایشی.

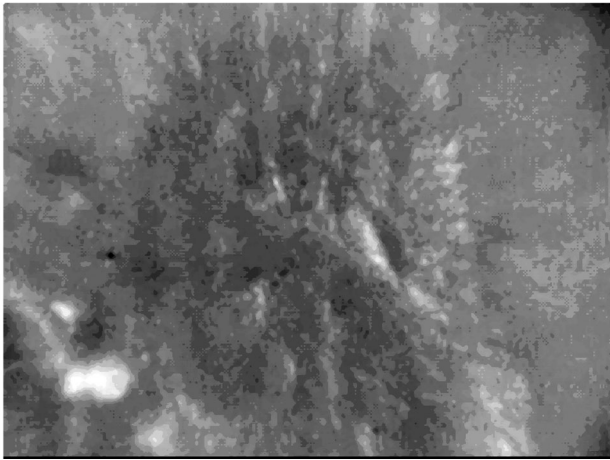
شرایط فرایند در جدول ۱ (آزمایش اول) نشان داده شده است. برش طولی یکی از نمونه های آزمایشی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، پوسته بدون حباب کاملاً متمایز از هسته اسفنجی است. ریزنگارهای یکی از نمونه ها در شکل ۶ با بزرگنمایی ۵۰ نشان داده شده است. این ریزنگارها به ترتیب نشان دهنده پوسته، ناحیه انتقالی، هسته، ناحیه انتقالی و پوسته است. نیمرخ چگالی نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. دو روش کلی برای بدست آوردن نیمرخ چگالی وجود دارد: اول استفاده از پرتو ایکس نرم و نوارهای رادیوگرافی و دوم تقسیم برشهایی از قطعه به اندازه های کوچکتر و اندازه گیری جرم و حجم هر یک از آنها. در این کار از روش اندازه گیری حجم و جرم نمونه های بریده شده استفاده شد. نمونه های دیگری با استفاده از آزودی کربن آمید در شرایط فرایندی مطابق جدول ۲ (آزمایش دوم و سوم) به روش کم فشار و فشار گاز متقابل ساخته شد که چگالی کلی آنها نیز در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

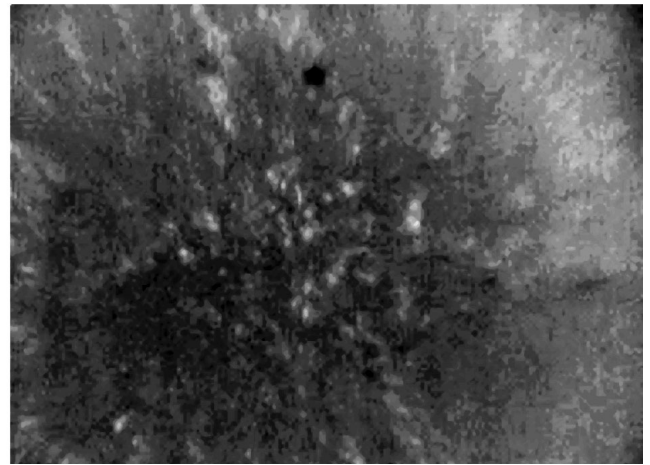
همان طور که در شکل ۶ مشخص است، از پوسته به سمت هسته تعداد حبابها بیشتر شده که نشان دهنده کاهش چگالی است و دوباره از هسته

جدول ۱- شرایط انجام آزمایش.

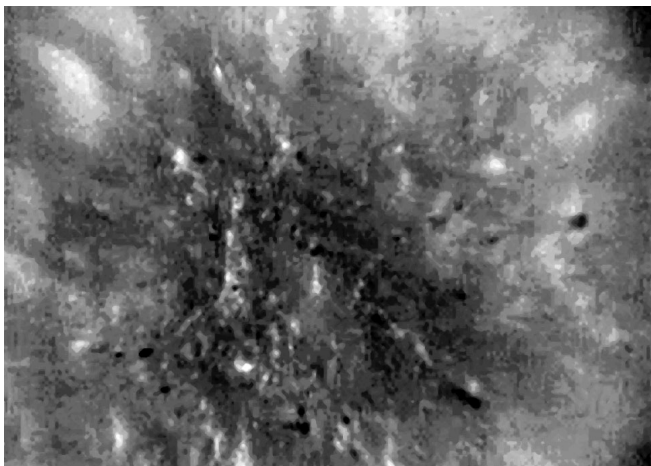
آزمایش	عامل پفزا	درصد عامل پفزا	زمان تزریق (ثانیه)	زمان قالبگیری (ثانیه)	دمای قالب (°C)	فشار متقابل (بار)	دمای مذاب (°C)	چگالی کلی (g/cm³)
۱	سدیم بی کربنات	۲	۳	۲۴۰	محیط	۰	۲۳۰	۰/۶۹
۲	آزودی کربن آمید	۲	۱	۲۲۰	محیط	۱۰	۲۳۰	۰/۴۹
۳	آزودی کربن آمید	۲	۱	۲۲۰	محیط	۰	۲۳۰	۰/۵



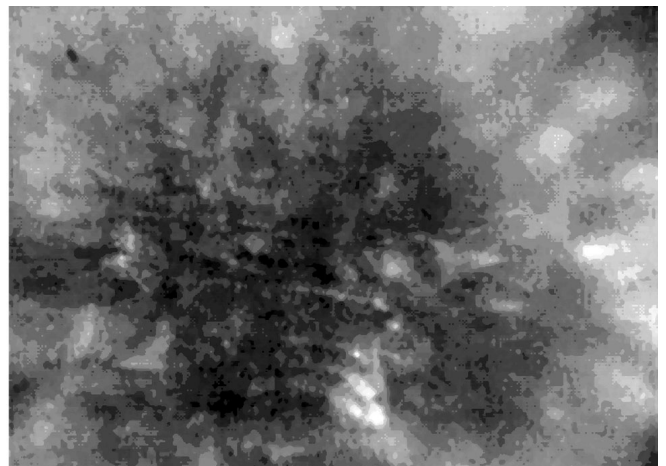
(ب)



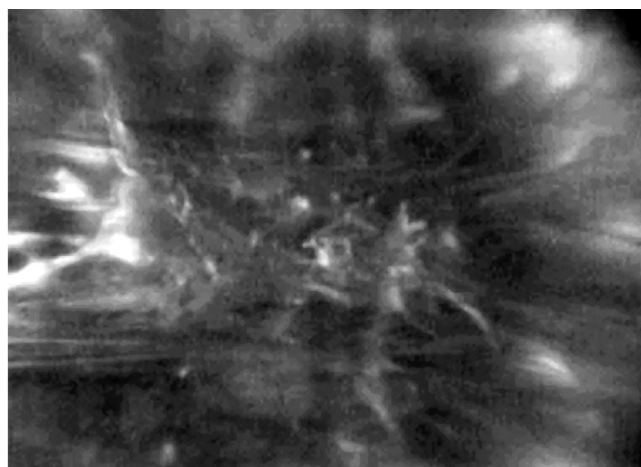
(الف)



(د)

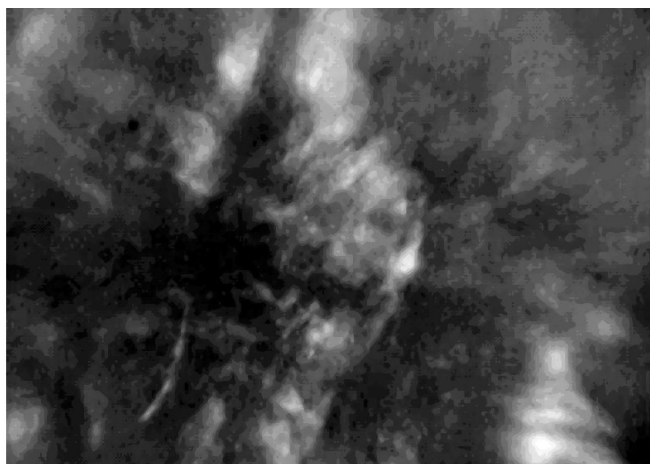


(ج)



(ه)

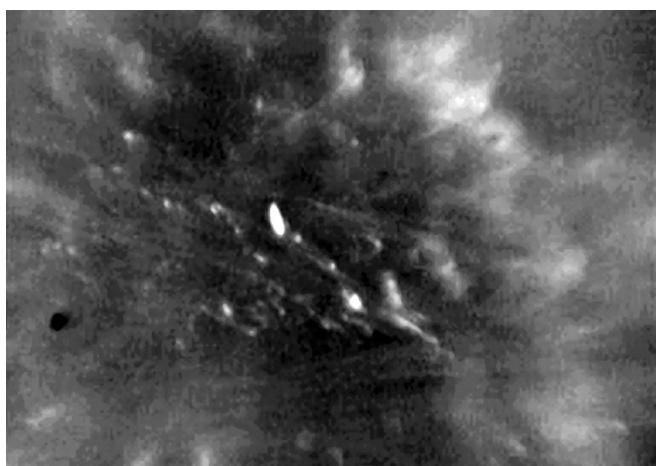
شکل ۹- ریزنگار سطح نمونه آزمایش ۲ با بزرگنمایی ۵۰ به روش فشار گاز متقابل: (الف) ابتدای قطعه، (ب)، (ج)، (د) قسمت میانی قطعه و (ه) انتهای قطعه.



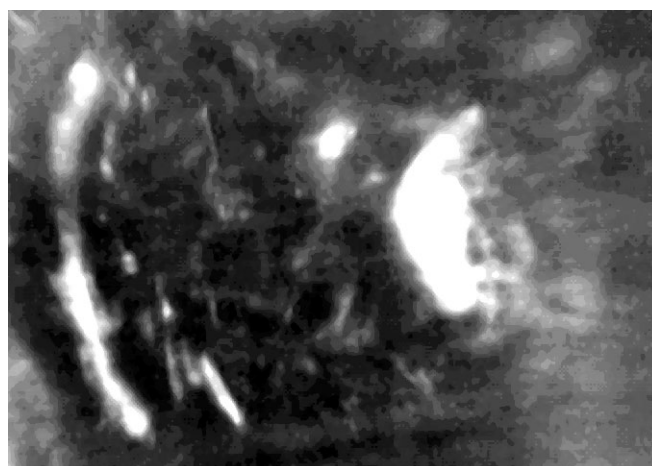
(ب)



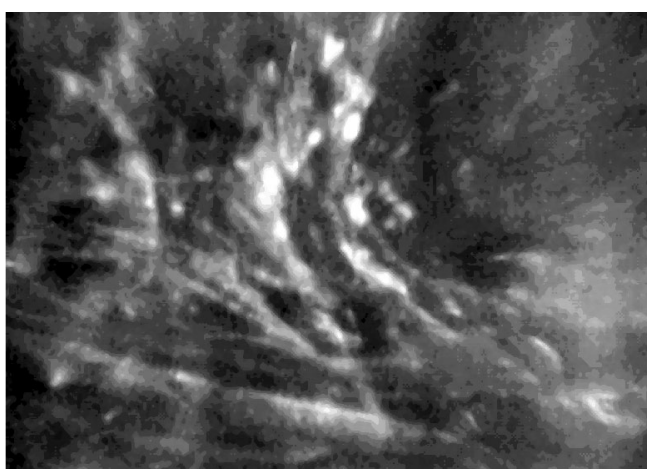
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۱۰- ریزنگار سطح نمونه آزمایش ۳ با بزرگنمایی ۵۰ به روش کم فشار: (الف) ابتدای قطعه، (ب)، (ج)، (د) قسمت میانی قطعه و (ه) انتهای قطعه.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این ریزنگارها به ترتیب از دریچه قالب شروع و به انتهای قالب به فاصله‌های ۲cm از یکدیگر ختم می‌شوند. همان طور که در این ریزنگارها مشخص است، زبری سطح در روش فشار گاز متقابل تا حدود زیادی بهبود یافته، اما در این نمونه‌ها نیز با فاصله گرفتن از دریچه قالب زبری سطح بیشتر می‌شود که باز به دلیل نوع فرایند است که به صورت کم ضرب است. در طراحی صنعتی می‌توان با ورود مواد به داخل قالب از چند نقطه این مسئله را تا حدودی حل کرد.

نتیجه‌گیری

فرایند طراحی شده شیوه‌ای نوین در تولید اسفنج ساختاری با استفاده از عامل پفزای شیمیایی به شیوه پیوسته است. به کمک این فرایند و سایر فرایندهای تولید اسفنج ساختاری می‌توان قطعه‌های ضخیم با ابعاد بزرگ عاری از فرورفتگی و تاب خوردگی تهیه کرد. به کمک روش فشار گاز متقابل می‌توان تا حدود زیادی کیفیت سطح قطعه را بهبود داد.

مراجع

- Hilyard N. C., *Mechanics of Cellular Plastics*, McMillan, England, 1982.
- Wu J.Sh. and Lee M.J., Studies on Gas Counter Pressure and Low Pressure Structural Foam Molding, Part1: Process Design and Effect of Processing Conditions on Surface Quality of Molded Parts, *Plast. Rubber Comp. Proc. Appl.*, **21**, 163-171, 1994.
- Shutov F.A., *Polymeric Integral/Structural Foam*, Springer Verlag, Germany, 1985.
- Semerdjiev S., *Introduction to Structural Foam*, Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, CT, USA, 1982.
- Cheng A.T., Apparatus and Method for Producing and Molding Structural Foam, *US Pat. 5,098,267*, 1990.
- باریکانی مهدی، سرائی مهرآسا، بررسی اثر متغیرهای فرمولبندی و فرایند در تهیه اسفنج‌های پلی اتیلن، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال چهاردهم، شماره ۲، صفحه ۸۲-۷۳، تیر ۱۳۸۰.
- Ahmadi A. A. and Hornsby P.R., *Molding and Characterization Studies with Polypropylene Structural Foam, Part 1: Structure-Property Interrelationships*, *Plast. Rubber Comp. Proc. Appl.*, **5**, 35-49, 1985.
- Villamizar C.A. and Han Ch.D., Studies on Structural Foam Processing II. Bubble Dynamics in Foam Injection Molding, *Polym. Eng. Sci.*, **18**, 699-710, 1978.
- Djournaliisky S., Christova D., Touleshkov N. and Nedkov E., Morphology and Orientation of PP-Structural Foam Moldings, *Pure Appl. Chem.*, **A35**, 1147-1158, 1998.
- Amon M. and Denson C.D., A Study of the Dynamics of Foam Growth: Simplified Analysis and Experimental Results for Bulk Density in Structural Foam Molding, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 255-297, 1986.
- Han Ch.D. and Yoo H.J., Studies on Structural Foam Processing VI. Bubble Growth During Mold Filling, *Polym. Eng. Sci.*, **21**, 518-533, 1981.