

اسفنجهای ساختاری

Structural Foams

ماسیس اکبریان، محمد حسین بهشتی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی شیمی - بخش مهندسی پلیمر

واژه‌های کلیدی:

اسفنجها، توزیع چگالی، عامل پف دهنده، فرایندهای شکل دهی

چکیده

اسفنجهای ساختاری از جمله برجسته‌ترین موادی به شمار می‌روند که طی ۲۰ سال اخیر ابداع شده‌اند. این مواد حاصل تلاشهایی می‌باشند که برای تولید اقتصادی قطعات بزرگ، محکم، سبک و اغلب پیچیده صورت گرفته است. این اسفنجها اغلب از گرمانرمهای سفت تولید می‌شوند و در مقایسه با اسفنجهای پلیمری معمولی ساختار ویژه‌ای دارند که در آن مغزه متخلخل و سلولی به تدریج به پوسته خارجی غیراسفنجی تبدیل می‌شود. چنین ساختاری نسبت استحکام به وزن بالایی به این مواد می‌دهد و آنها را برای کاربردهای ساختاری مناسب می‌سازد.

در این مقاله، پس از بحثی مقدماتی و تعریف اسفنجهای ساختاری مطالبی پیرامون مواد اولیه، پف دهنده‌ها، روشهای تهیه و شکل دهی، جزئیات مربوط به دستگاههای تولید و مقایسه روشها و تاثیر متغیرهای روشهای تولید بر کیفیت سطح و چگالی ارائه می‌شود.

مقدمه

پلیمرهای اسفنجی یا سلولی (cellular polymers) یا اسفنجهای پلیمری (polymer foams) مواد چند فازی می‌باشند که دستکم شامل یک فاز ماتریس پلیمری و یک فاز سیال‌اند و معمولاً این فاز سیال را گاز تشکیل می‌دهد. بیشتر مواد پلیمری را می‌توان به صورت محصولات اسفنجی منبسط کرد، ولی تعداد کمی از آنها به صورت تجارتي تولید می‌شوند.

اسفنجهای پلیمری به دلیل ماهیت پیچیده‌ای که دارند به راههای گوناگون تقسیم بندی می‌شوند. متداولترین تقسیم بندیها براساس شکل شناسی سلولها، رفتار مکانیکی و ترکیب درصد می‌باشد. از نظر ساختاری سلولها ممکن است به صورت باز (open) یا بسته (closed) باشند. در اسفنجهای سلول بسته، گاز به صورت حبابهای جدا از هم در ماتریس پلیمری که فاز پیوسته را تشکیل می‌دهد پخش شده است. در اسفنجهای سلول باز حبابها یا حفره‌های گاز به هم راه دارند، به گونه‌ای که هر دو فاز گاز و جامد به صورت پیوسته می‌باشند [1].

اسفنجهای پلیمری را براساس میزان سختی (stiffness) آنها نیز

تقسیم بندی می‌کنند که از این نظر به سه دسته صلب (rigid)، نیمه صلب (semi-rigid) و انعطاف پذیر (flexible) تقسیم می‌شوند. در اسفنجهای صلب ماتریس یا بلوری است و در صورتی که بی شکل باشد در دمایی زیر دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) خود می‌باشد. در اسفنجهای انعطاف پذیر، ماتریس پلیمری در دماهای بالای Tg خود قرار دارد. اسفنجهای نیمه صلب، حد واسط این دو دسته‌اند [1].

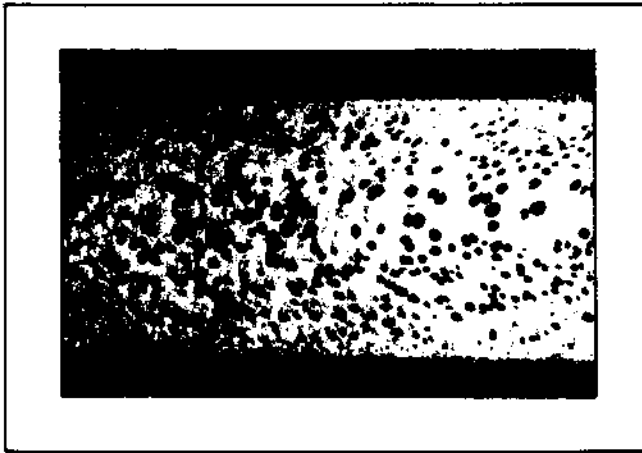
اسفنجهای پلیمری در گستره وسیعی از ساختار وجود دارند. آنها ممکن است از نظر ساختاری همگن با شکل شناسی یکنواخت سلولها یا ناهمسان باشند. آنها یا یک پوسته پلیمری جامد دارند یا از چند جزء تشکیل شده‌اند که پوسته پلیمری ترکیب درصد متفاوتی از پلیمر اسفنجی مغزه دارد. انواع مختلف این ساختارها در شکل ۱ نشان داده شده است [1].

اسفنجهای ساختاری یکی از مهمترین اسفنجهایی می‌باشند که در طی ۲۰ سال گذشته توسعه زیادی یافته‌اند. همراه با رشد سریع این اسفنجها، سامی گوناگونی نیز به آنها داده شده است. امروزه برای این مواد ساختاری دو نام وجود دارد. در امریکا و ژاپن به این دسته مواد اسفنجهای ساختاری (structural foams) و در اروپا و شوروی اسفنجهای با پوسته یکپارچه (integral skin foams) یا به طور مختصر اسفنجهای یکپارچه گویند. این اسفنجها نخستین بار در اواخر سال ۱۹۵۰ توسط بایر (Bayer) و دال (Dahl) مطرح شدند، ولی در نیمه سال ۱۹۶۰ توسط یونیون کارباید (Union Carbide) تولید تجاری آنها آغاز شد [1].

غالب محصولات اسفنجهای ساختاری (حدود ۸۵٪) از گرمانرمها ساخته می‌شوند. پلی یورتان نخستین گرمانرمی است که اسفنج ساختاری آن تهیه شد. پلیمرهای بدون پرکننده و تقویت کننده حدود ۷۰٪ محصولات اسفنجهای ساختاری را دربر می‌گیرند [3].

Key Words:

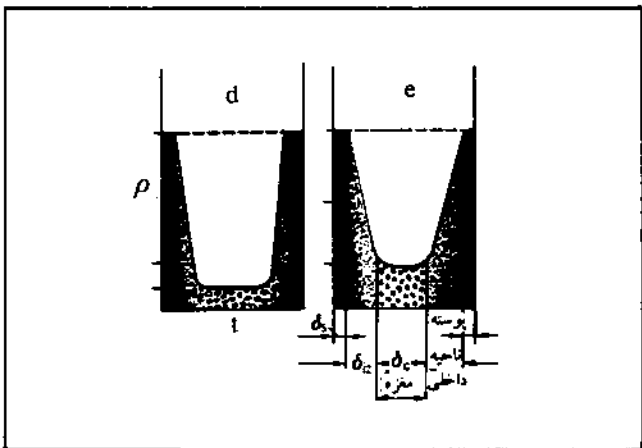
foams, density distribution, blowing agent, processing



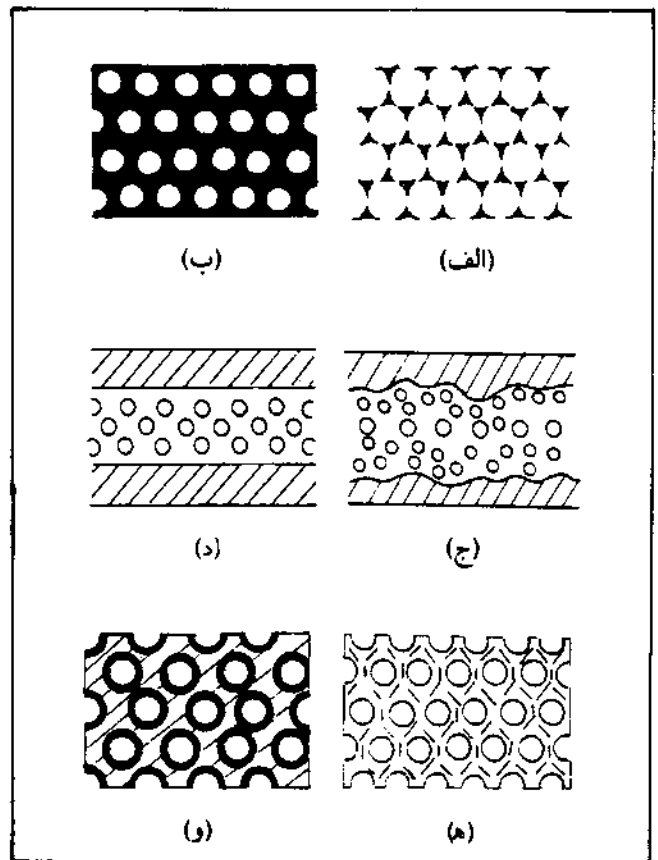
شکل ۲ - سطح مقطع یک نمونه اسفنج ساختاری [2].

از آنجا که ساختار این گونه مواد شبیه ساختار چوب طبیعی است، اغلب به اسفنجهای ساختاری چوبهای مصنوعی نیز می‌گویند. علت دیگر این نامگذاری کاربرد اصلی اسفنجهای ساختاری است که جایگزین محصولات چوبی شده‌اند.

تفاوت اساسی بین اسفنجهای ساختاری و اسفنجهای پلیمری معمولی (غیر ساختاری)، در نسبت ضخامت پوسته به ضخامت کلی آنهاست و این نکته‌ای است که هنگام مقایسه این اسفنجها با اسفنجهای معمولی مطرح می‌شود. بدین ترتیب که حتی اگر چگالی آنها در حدود هم باشد نوع ساختاری خصوصیات ساختاری بهتری دارد. به عنوان مثال، خواص مکانیکی یک قطعه اسفنج ساختاری پلی یورتان حدود ۵۰٪ بهتر از قطعه ساخته شده از اسفنج پلی یورتان معمولی با همان چگالی و فرمولبندی است (جدول ۱) [2].



شکل ۳ - توزیع چگالی در یک سطح مقطع اسفنج ساختاری (چگالی متوسط 200 Kg/m^3 و چگالی مغزه آن 120 Kg/m^3 است) که در آن سه ناحیه کاملاً مشخص وجود دارد (شکل ۲). این سه ناحیه عبارت‌اند از: (۱) ناحیه پوسته، (۲) ناحیه انتقالی یا میانی و (۳) ناحیه مغزه.



شکل ۱ - انواع مختلف اسفنجهای پلیمری: (الف) اسفنج با چگالی پایین و دارای سلولهای باز، (ب) اسفنج با چگالی بالا و دارای مولکولهای بسته، (ج) اسفنج ساختاری تک ماده‌ای با مغز اسفنجی و پوسته جامد، (د) اسفنج ساختاری چند جزئی (یا چند ماده‌ای)، (ه) اسفنج سلول بسته تقویت شده با الیاف و (و) اسفنج سینتاکتیک [1].

تعریف اسفنجهای ساختاری

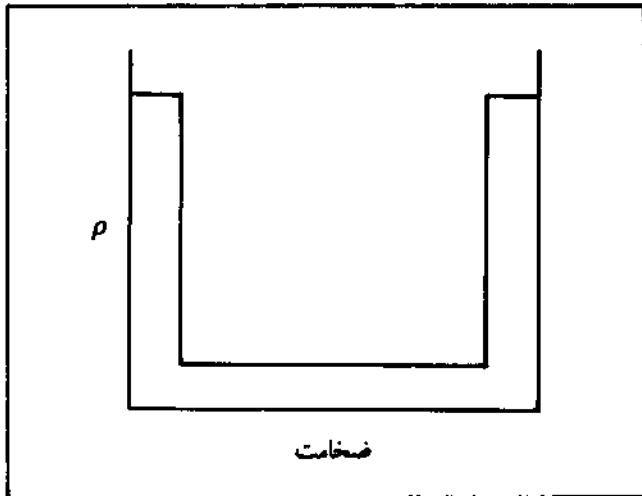
یکی از عوامل مهم در توسعه تکنولوژی پلیمرها اسفنجهای ساختاری است. این اسفنجها دارای ساختار ویژه‌ای می‌باشند، به گونه‌ای که مغزه (core) می‌تواند متخلخل و پوسته‌ای جامد دارند و چگالی پوسته برابر یا نزدیک چگالی پلیمر غیر اسفنجی است. در شکل ۲ سطح مقطع یک نمونه اسفنج ساختاری نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مغزه این نمونه متخلخل و اسفنجی است، ولی پوسته آن را پلیمر نسبتاً غیر اسفنجی تشکیل می‌دهد. در یک اسفنج ساختاری ۳ ناحیه کاملاً مشخص وجود دارد (شکل ۲). این سه ناحیه عبارت‌اند از: (۱) ناحیه پوسته، (۲) ناحیه انتقالی یا میانی و (۳) ناحیه مغزه.

چگالی ناحیه پوسته تقریباً برابر چگالی پلیمر غیر اسفنجی است. در ناحیه انتقالی یا میانی از مغزه به سوی سطح چگالی به تدریج افزایش می‌یابد و ناحیه مغزه کمترین چگالی را دارد (شکل ۳). نقش پوسته دادن سفتی و استحکام لازم به این گونه مواد است، در حالی که

جدول ۱ - مقایسه خواص اسفنجهای پلی پورتان از نوع ساختاری و معمولی [2].

خواص	اسفنج ساختاری	اسفنج غیر ساختاری
چگالی (Kg/m^3)	۴۳۲	۴۱۶
استحکام خمشی (MPa)	۱۵/۰۵	۱۰/۰
ضریب خمشی (MPa)	۴۴۱	۳۱۱
استحکام کششی (MPa)	۸/۱	۶/۴

آن است که در سازه ساندویچی گرادیان چگالی به طور یکنواخت از سطح تا مغزه وجود ندارد و تغییر چگالی از سطح به مغزه ناگهانی است. در شکل ۵ توزیع چگالی در یک سازه ساندویچی نشان داده شده است. علاوه بر تفاوت اساسی یاد شده، قطعات با ضخامت کم را نمی توان به روش تهیه سازه های ساندویچی تولید کرد. ولی می توان آنها را از اسفنجهای ساختاری ساخت (دستکم ضخامت گزارش شده برای اسفنجهای ساختاری ۳/۲mm می باشد [2]). همچنین قطعات پیچیده را به روش سازه های ساندویچی نمی توان تولید کرد ولی با استفاده از اسفنجهای ساختاری قابل تهیه می باشد.



شکل ۵ - تغییرات چگالی بر حسب ضخامت در یک سازه ساندویچی.

قطعات ساخته شده از اسفنجهای ساختاری دارای مزایای زیرند

[2]:

- وزن آنها در مقایسه با همان حجم از پلیمر غیر اسفنجی به مراتب کمتر است.

- خیلی سخت می باشند، زیرا می توانند با پوسته های ضخیم تولید شوند.

- قطعه نهایی اسفنج ساختاری تنش (frozen-in stress) کمی دارد، یعنی تنش کمی در آن محسوس است و از این رو تغییر شکل کمی دارد یا اصلاً ندارد.

- با استفاده از آنها می توان قطعات با ضخامت دیواره زیاد و با تغییرات زیاد ضخامت دیواره تولید کرد.

- به علت ساختار متخلخل آنها، قطعه نهایی را به خوبی می توان ماشین کاری کرد.

سه محدودیت در فرآورش اسفنجهای ساختاری وجود دارد که عبارت اند از: پایین بودن کیفیت ظاهری سطح قطعه قالبگیری شده [1,2]، بالا بودن زمان سرد شدن در فرایند تولید [2,3] و کنترل ناپذیری توزیع چگالی در قطعه [1].

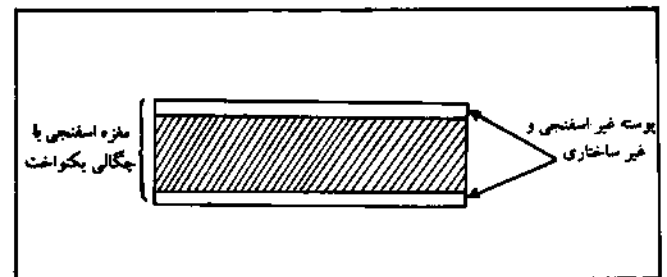
اسفنج ساختاری طبق تعریف استاندارد آلمان (DIN-۷۷۲۹)

اسفنجی دارای یک ناحیه پوسته است که در فرایند قالبگیری به وجود می آید و چگالی این پوسته بیشتر از چگالی مغزه (و تقریباً برابر با چگالی پلیمر در حالت غیر اسفنجی) می باشد [2].

انجمن صنعت پلاستیک آمریکا (SPI) اسفنجهای ساختاری را به عنوان محصولات پلاستیکی تعریف می کند که دارای پوسته یکپارچه و مغزه سلولی شکل می باشند و نسبت استحکام به وزن کافی دارند تا در دسته مواد ساختاری قرار گیرند [3].

شاید اگر اسفنجهای ساختاری به عنوان موادی تعریف شوند که پوسته ای جامد و غیر متخلخل و مغزی متخلخل دارند و گرادیان چگالی تقریباً یکنواختی از سطح تا مغز در آنها وجود دارد، تعریفی شایسته تر برای این مواد باشد.

سازه های ساندویچی بدان جهت طراحی شدند که خصوصیات شبیه اسفنجهای ساختاری داشته باشند ولی نباید اسفنجهای ساختاری را با سازه های ساندویچی اشتباه گرفت. در سازه های ساندویچی لایه رویی و زیرین را یک ورق پلاستیکی با ضخامت کاملاً مشخص غیر اسفنجی و غیر ساختاری تشکیل می دهد و مغزه آن یک اسفنج با چگالی یکنواخت است. در شکل ۴ طرحی از یک سازه ساندویچی نشان داده شده است. این سازه به وسیله اتصال دو صفحه پیش ساخته به یک هسته اسفنجی به وجود می آیند.



شکل ۴ - طرحی از یک سازه ساندویچی.

تفاوت اساسی یک سازه ساندویچی و یک اسفنج ساختاری

پایه پلیمری: نخستین اختراعات در زمینه تکنولوژی اسفنجهای ساختاری بین سالهای ۱۹۶۲ و ۱۹۶۴ به ثبت رسیده است. این اختراعاتی ثبت شده در مورد اسفنجهای ساختاری پلی استیرن بود و منبایی شد تا بعدها در اروپا و آمریکا از آنها جهت تهیه انواع تجاری اسفنج ساختاری پلی استیرن استفاده شود. در سالهای بعد اسفنجهای ساختاری پلی اولفینها و پلی وینیل کلرید مطرح شدند [2].

اسفنجهای ساختاری تجاری، اغلب از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا ساخته می‌شوند و تهیه اسفنجهای ساختاری از پلیمرهای زیر گزارش شده است [2]: پلی استیرن، پلی اولفینها (پلی اتیلن و پلی پروپیلن)، پلی وینیل کلرید، پلی کربنات، پلی فنیلن اکسید، ABS، پلی آمیدها، پلی استرهای گرمانرم. به تازگی، پلی یورتان و ترکیبات یورتان اصلاح شده با سایر پلیمرها و ترجیحاً با رزینهای گرمانرم، به عنوان اسفنجهای ساختاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعدها اسفنجهای ساختاری تجاری بالا به رزینهای فنول فرمالدهید، اپوکسی و پلی ایزوسیانات نیز مطرح شدند.

به تازگی از شبکه‌های درهم فرورونده همزمان (Simultaneous Interpenetrating Networks) و شبکه‌های درهم فرورونده (Interpenetrating Networks) IPN برای تهیه اسفنجهای ساختاری توسط فرایند قالبگیری تزریقی واکنشی (Reaction، RIM، Injection Moulding) استفاده شده است.

عامل پف دهنده

خصوصیات و جنبه‌های اقتصادی تولید اسفنجهای ساختاری اساساً به عامل پف دهنده (blowing agent) بستگی دارد. عامل پف دهنده ایده آل عاملی است که ضمن سازگاری با پلیمر، پوسته‌ای عاری از هرگونه حفره ایجاد کند و ناحیه انتقال یکواختی از سطح تا مغزه فراهم آورد. به علاوه، بیشترین کارایی را در کمترین غلظت و قیمت داشته باشد.

از عوامل پف دهنده فیزیکی، شیمیایی و مخلوط آنها برای تهیه اسفنجهای ساختاری استفاده می‌شود. رایجترین عوامل پف دهنده فیزیکی فرتون، نیتروژن، هیدروژن و هوای فشرده‌اند که در میان آنها از نیتروژن بیشتر استفاده می‌شود. انواع عوامل پف دهنده شیمیایی تجاری که در اسفنجهای ساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرند در جدول ۲ آورده شده‌اند و رایجترین آنها آزودی کربن آمید، ۵-فنیل ترازول و انواع سولفونیل هیدرازید می‌باشند.

فرایندهای شکل‌دهی

اسفنجهای ساختاری به روشهای مختلف فراورش می‌شوند که مهمترین روشهای تجاری عبارت‌اند از:

- قالبگیری تزریقی پیشرفته،

- قالبگیری تزریقی واکنشی،

- اکستروژن،

- قالبگیری دمشی،

- قالبگیری چرخشی.

روش اصلی فراورش (در ۷۵٪ موارد) قالبگیری تزریقی پیشرفته است [3]. این روش متداول خود به چند روش تقسیم می‌شود که به ترتیب مورد بحث قرار می‌گیرند.

قالبگیری تزریقی

تقسیم بندی فرایندهای قالبگیری تزریقی اسفنجهای ساختاری به چند شیوه صورت می‌گیرد که در اینجا آنها را در چهار گروه بررسی می‌کنیم [2].

۱- فرایندهای تزریقی در فشار پایین (تا حدود ۲۰ MPa)،

۲- فرایندهای تزریقی در فشار بالا (تا حدود ۱۰۰ MPa یا

بیشتر)،

۳- فرایند تزریقی با فشار معکوس گاز (gas counter

pressure)،

۴- فرایند هم تزریقی (co-injection).

فراورش اسفنجهای ساختاری نیاز به حل کردن مقدار مشخصی از یک ماده شیمیایی تولیدکننده گاز (عامل پف دهنده) در پلیمر نرم شده یا مذاب در شرایط فراورش دارد. بسته به این شرایط عامل پف دهنده می‌تواند یک ماده شیمیایی خالص یا ناپایدار گرمایی نظیر آزودی کربن آمید، یک مایع فرار مانند کلروفلوئور کربن، یک هیدروکربن با نقطه جوش پایین نظیر بوتان یا یک گاز مانند نیتروژن باشد. فشار به مذاب پلیمر اعمال می‌شود تا گاز پف دهنده یا مایع حل شده در پلیمر حفظ شود و از ماشین قالبگیری تا حفره قالب انتقال یابد. عمل اسفنجی شدن با یک افت ناگهانی در فشار اتفاق می‌افتد و با تزریق مواد به درون قالب بسته فرایند به پایان می‌رسد [2].

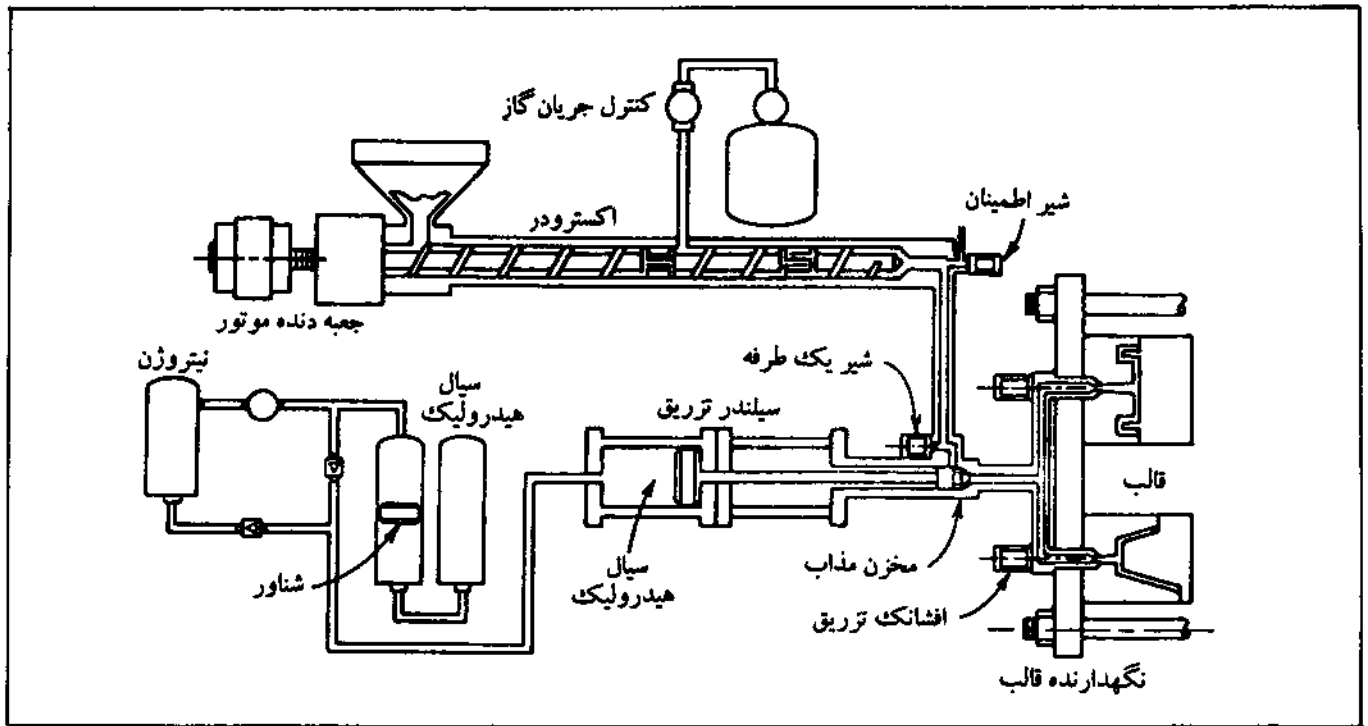
قالبگیری تزریقی فشار پایین

اگر حجم مواد انتقال یافته به درون قالب کمتر از حجم حفره قالب باشد این فرایند، فرایند فشار پایین نامیده می‌شود. در این حالت مواد فرار موجود در مذاب پلیمر به صورت حبابهایی شکل می‌گیرند و مذاب را منبسط می‌کنند تا حفره قالب را پر کنند. میزان و گستردگی اسفنجی شدن تابع مقدار و چگونگی توزیع عامل پف دهنده اضافه شده به مذاب پلیمر، دمای مذاب پلیمر، دمای قالب، سرعت تزریق و فشار اعمال شده به مذاب جهت انتقال آن به درون حفره قالب است. ویژگی ماشینهای قالبگیری تزریقی فشار پایین برای اسفنجهای ساختاری با کاربردهای ویژه این است که قطر پیچ آنها کوچک می‌باشد [3]. این ماشینها یک مخزن دارند که با گرما دادن به دمای مورد نظر می‌رسد و پلیمر قابل

شرکت تولید کننده	نام تجاری	درصد وزنی مورد استفاده	محدوده دمای مورد استفاده (°C)	دمای تجزیه (°C)	عامل پف کننده
F(Fairmont)	Azocel	۰/۵	۱۷۷-۲۲۲	۲۰۴	آزودی کرینامید
UC(Uniroyal)	Celogen AZ				
FIC(Flacons)	Ficel AC				
NPD(National Polychemical)	Kempore				
B(Bayer)	Porofor ADC				
E(Eiwa)	Vinyfor AC				
UC	Celogen AZNP	۰/۵	۱۷۷-۲۲۲	۲۰۴	آزودی کرینامید اصلاح شده
FIC	Ficel FP				
NPD	Kempore MC				
UC	Celogen OT	۰/۷۵	۱۴۹-۱۷۷	۱۵۷	P, P - اکسی - بیس (بتزن سولفونیل هیدرازید)
FIC	Ficel OB				
E	Neocellborn				
NPD	Nitropore OBSH				
UC	Celogen CB	۰/۷۵	۱۷۷-۲۲۲	۱۹۹	هیدرازید نامشخص
UC	Celogen RA	۰/۷۵	۲۰۴-۲۶۰	۲۲۷	P - تولون سولفونیل سمی کاربازید
NPD	Expandex ۵-RT	۰/۳	۲۴۹-۳۱۶	۲۴۹	۵- فنیل ترازول
FIC	Ficel THT	۰/۴	۲۶۰-۳۱۶	۲۶۵	نوع تری هیدرازین تری آزین
UC	Celogen HT-۵۵۰	۰/۳	۲۶۰-۳۴۳	۲۸۸	مشق هیدرازین
S(Sherwin)	Kemtec ۳۰۰	۰/۶	۱۵۴-۲۳۲		آروماتیک ۳۰۰
S	Kemtec ۵۰۰	۰/۸	۲۷۱-۳۱۵		آروماتیک ۵۰۰
S	Kemtec ۵۰۰HP	۰/۸	۲۷۱-۳۱۵		آروماتیک ۵۰۰HP
S	Kemtec ۵۵۰	۰/۸	۲۸۷-۳۳۰		آروماتیک ۵۵۰

به صورت جابهای ریز انجام شود و پس از رشد جابها و رسیدن به دیواره‌های قالب آن را پر کنند. در این حالت فشار درون قالب به ناچار برابر فشار گاز ناشی از عامل پف دهنده است و به دلیل آنکه قالب به طور کامل پر نمی‌شود، قطعه کیفیت ظاهری سطحی خوبی ندارد و جابهای ریزی در سطح آن مشاهده می‌شود. این نواقص سطحی اسپلی (splay) نامیده می‌شوند و کارهای زیادی صورت گرفته است تا با

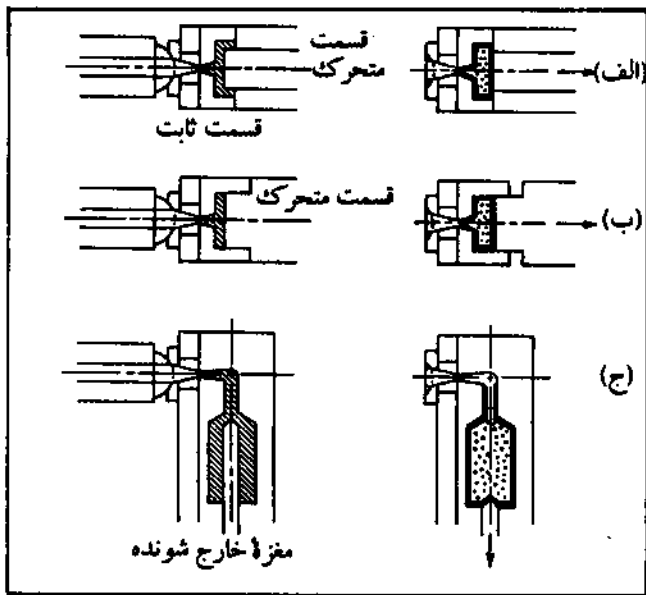
اسفنجی شدن زیر فشار در آنجا نگهداری می‌شود و دارای سیستم نگهدارنده قالب نیز می‌باشند. در ماشینهای یاد شده یک شیر یک طرفه بین پیچ و مخزن قرار دارد و سیستم افشانک (nozzle) قطع کننده مثبت بین مخزن و حفره قالب قرار می‌گیرد (شکل ۶). در فرایند قالبگیری چون حجم مواد انتقال یافته به درون قالب کمتر از حجم حفره می‌باشد فشار درون حفره پایین است. فشار پایین حفره، امکان می‌دهد که هسته کاری



شکل ۶- قالبگیری تزریقی فشار پایین با کاربرد ویژه که سیستم چند افشانکی دارد و نیتروژن عامل پف دهنده در آن است [3].

اعمال می شود، نیازی نیست. در قالبگیری فشار بالا، اسفنجی شدن پس از تزریق در اثر انبساط قالب یا خروج مواد از قالب صورت می گیرد. در این حالت چون قالب به طور کامل پر می شود، کیفیت ظاهری قطعه نسبت به فرایند فشار پایین بهتر است و سطح قطعه تقریباً عاری از هرگونه عیب و نقص است.

بر طرف کردن آنها کیفیت ظاهری سطح بهبود یابد. این فرایند شامل چرخه گرمایی، سرد کردن قالب، تزریق مستقیم گاز پف دهنده به درون مذاب و تزریق مذاب به درون قالب گازگیری سطحی پلیمر قابل نرم شدن قبل از تزریق و کنترل میزان انبساط است.



شکل ۷- حرکت‌های قالب در قالبگیری تزریقی فشار بالای اسفنجی‌های ساختاری: (الف) صفحه صاف عقب می‌رود، (ب) صفحه قالب حرکت می‌کند و (ج) مغزله درون حفره بیرون کشیده می‌شود [3].

قالبگیری تزریقی فشار بالا

در این حالت پلیمر قابل اسفنجی شدن با حجمی برابر حجم حفره قالب به درون قالب تزریق می‌شود، از این رو اسفنجی شدن در این مرحله صورت نمی‌گیرد. سپس قالب به مقدار جزئی باز می‌شود یا قسمتی از آن به گونه‌ای حرکت می‌کند که حجم حفره افزایش یابد. این عمل به مواد درون حفره امکان اسفنجی شدن می‌دهد (شکل ۷). در فرایند تزریق یا شده فشاری که درون قالب به وجود می‌آید متناسب با میزان پر شدن حفره قالب است. در قالبگیری تزریقی معمولی ابتدا قالب کاملاً پر می‌شود آن گاه، مواد درون قالب زیر فشار بالا متراکم می‌گردند تا میزان جمع شدگی که در اثر سرد شدن مواد به وجود می‌آید جبران شود. متراکم شدن مواد در فشار بالا سبب می‌شود که قطعه‌ای با دقت ابعادی بالا و عاری از هرگونه حفره‌های زیر سطحی و تاب خوردگی به دست آید. در فرایند قالبگیری تزریقی فشار بالای اسفنجی‌های ساختاری قالب کاملاً پر می‌شود ولی مواد درون آن متراکم نمی‌شوند، بنابراین به فشار قالبگیری بالا نظیر آنچه برای قالبگیری تزریقی مواد معمولی

در هر دو فرایند قالبگیری تزریقی معمولی و قالبگیری تزریقی اسفنجی ساختاری، مذاب پلیمر به درون حفره قالب انتقال می‌یابد. در قالبگیری تزریقی معمولی انتقال به گونه‌ای صورت می‌گیرد که جریان مواد تا حد امکان کمترین میزان ناپایداری یا مغشوش بودن را داشته باشد و بهترین حالت، پر شدن حفره قالب با یک جریان آرام است. از این رو، دریچه‌ها (gates) و راهگاهها (runners) به گونه‌ای طراحی می‌شوند که میزان مغشوش بودن را به حداقل برسانند. به عبارت دیگر، دروازه باید به صورت یک شیر کنترل عمل کند و از جریان برگشتی مواد متراکم شده درون حفره طی زمان سرد شدن جلوگیری به عمل آورد. در نتیجه، دریچه باید کوچک و سرعت تزریق پایین در نظر گرفته شود.

به طور کلی، فرایند قالبگیری تزریقی اسفنجی ساختاری در مقایسه با فرایند قالبگیری تزریقی معمولی، فرایند فشار پایین به حساب می‌آید. فشار پشت قالب مورد نیاز (clamping pressure) برای این فرایندها به شرح زیر است:

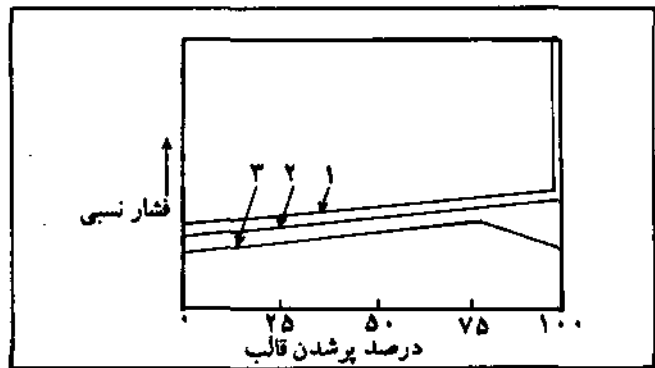
- قالبگیری تزریقی معمولی ۵۶-۲۸ MPa،

- قالبگیری تزریقی اسفنجی ساختاری فشار بالا ۱۴-۷ MPa،

- قالبگیری تزریقی اسفنجی ساختاری فشار پایین

۳/۵-۷ MPa.

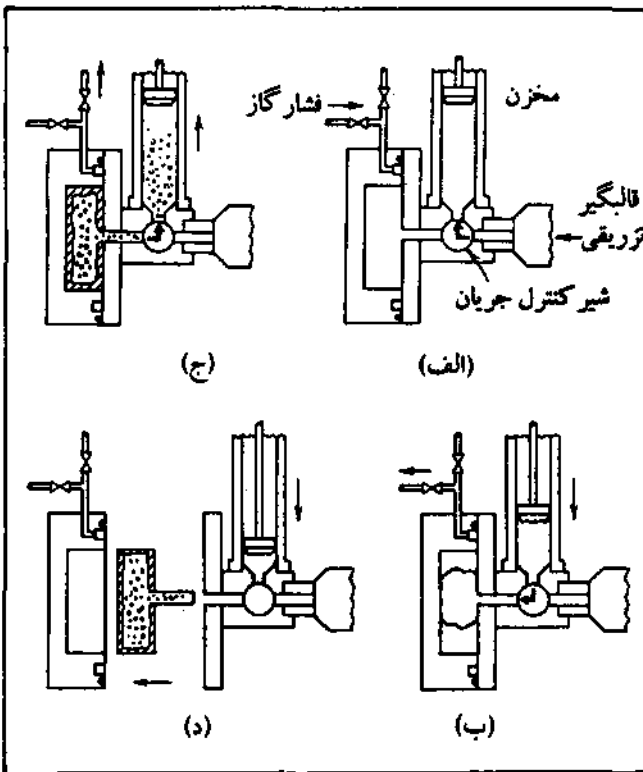
در شکل ۸ اثر درصد پر شدن قالب روی فشار قالب در فرایندهای تزریقی مختلف نشان داده شده است.



شکل ۸- اثر درصد پر شدن قالب روی فشار قالب: (۱) قالبگیری تزریقی معمولی، (۲) قالبگیری تزریقی فشار بالا و (۳) قالبگیری تزریقی فشار پایین [2].

قالبگیری تزریقی با فشار معکوس گاز

در این فرایند پلیمر قابل اسفنجی شدن به درون قالب که زیر فشار بالای گاز نیتروژن است تزریق می‌شود و با کاهش فشار گاز امکان داده می‌شود تا اسفنج به مقدار کنترل شده‌ای منبسط گردد. در این فرایند سطح قطعه از کیفیت خوبی برخوردار می‌شود و مقاومت در برابر ضربه آن به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد (شکل ۹).



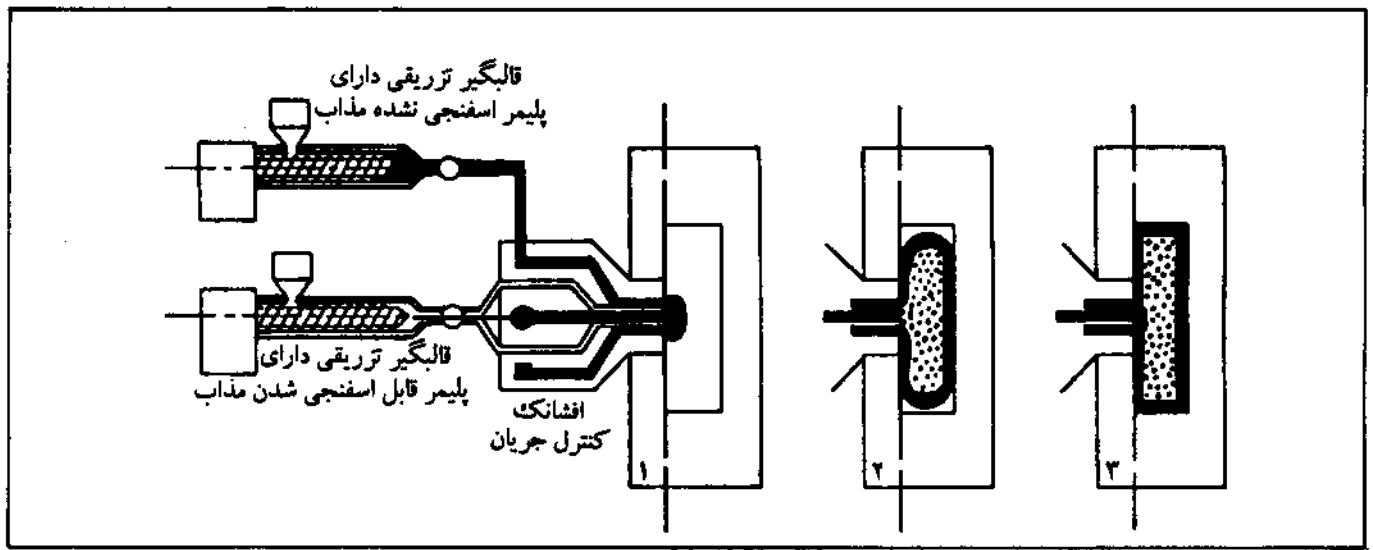
شکل ۹- فرایند قالبگیری تزریقی اسفنجی ساختاری با فشار معکوس گاز: (الف) قالب خالی و زیر فشار گاز می‌باشد و پلیمر قابل اسفنجی شدن در مخزن موجود است، (ب) پلیمر قابل اسفنجی شدن در برابر فشار گاز به درون قالب تزریق می‌شود، (ج) فشار گاز بر طرف می‌شود، پیستون مخزن به عقب برمی‌گردد تا امکان اسفنجی شدن به مواد داده شود و (د) قطعه خارج شده و پلیمر در مخزن دوباره فشرده می‌شود [3].

قالبگیری با تزریق همزمان (اسفنجی دو جزئی)

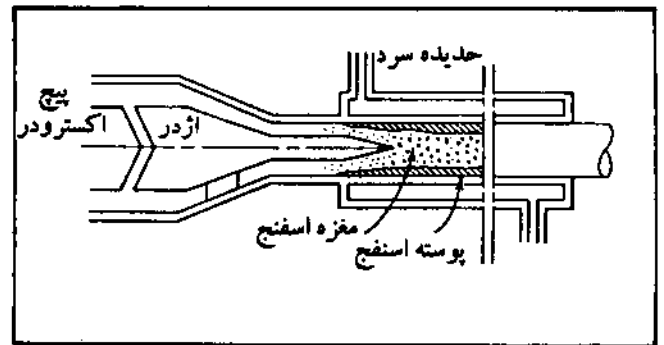
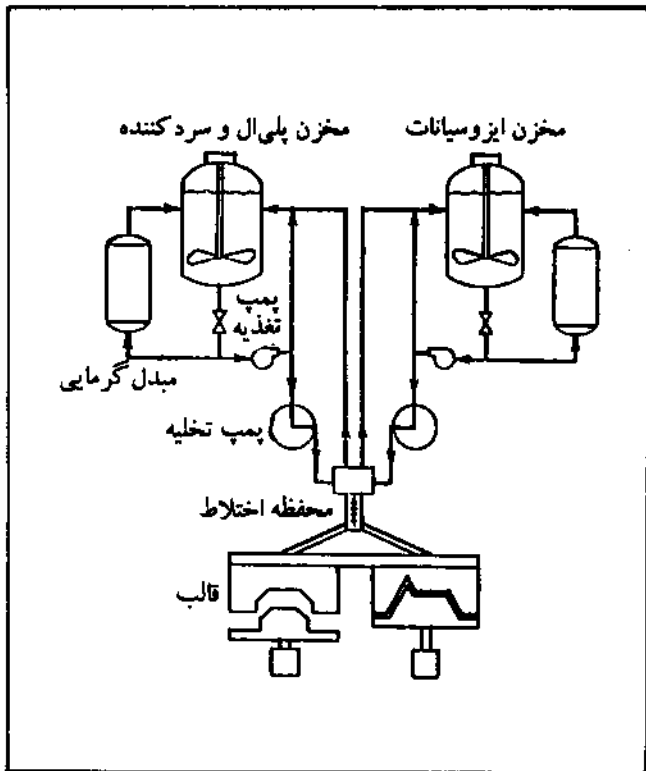
مقدار کمی از پلیمر غیر قابل اسفنجی شدن به درون حفره قالب تزریق می‌شود (قسمت ۱ از شکل ۱۰). سپس پلیمر اسفنجی شده تزریق می‌گردد و سبب انبساط مواد تا دیواره قالب می‌شود (قسمت ۲). آن‌گاه، حفره قالب با افزودن پلیمر غیر قابل اسفنجی شدن بسته می‌شود (قسمت ۳). از آنجا که در این فرایند، پلیمر اسفنجی شده توسط پوسته غیر اسفنجی محصور می‌گردد، کیفیت سطحی قطعه به مراتب بهتر از سایر روشهای تزریقی است. لوله‌های فاضلاب از اسفنجی دو جزئی توسط اکستروژن تهیه می‌شوند.

اکستروژن

در فرایند اکستروژن به پلیمر قابل اسفنجی شدن امکان داده می‌شود تا در اثر سرمای حدیده با اصطکاک کم منبسط گردد (شکل ۱۱). شکل دیواره حدیده باید به دقت طراحی شود تا اسفنج زیر فشار کنترل نشده دیگری قرار نگیرد.



شکل ۱۰- فرایند تزریق همزمان (فرایند تزریقی اسفنجهای گرم انرم تزریقی دو جزئی): (۱) افشانک کنترل جریان باز شده پلیمر غیر قابل اسفنجی شدن تزریق می شود، (۲) پلیمر قابل اسفنجی شدن و پلیمر غیر قابل اسفنجی شدن همزمان تزریق می گردند و (۳) تنها پلیمر غیر قابل اسفنجی شدن تزریق می شود [3].



شکل ۱۱- فرایند اکستروژن اسفنجهای ساختاری گرم انرم [3].

فرایند قالبگیری تزریقی واکنشی

در قالبگیری تزریقی واکنشی پلی یورتان، مقدار مشخص و کنترل شده‌ای از ایزوسیانات و پلی ال به طور کامل مخلوط می گردند و به درون قالب بسته، در فشار پایین (۳۰۰-۴۰۰ KPa) تزریق می شوند. عامل پف دهنده ممکن است در هر دو جزء یا در یک جزء حل شده باشد که در اثر گرمای ناشی از پلیمر شدن تبخیر می گردد (شکل ۱۲).

مقایسه فرایندهای مختلف تولید اسفنجهای ساختاری

این فرایندها را می توان از جنبه های مختلف با یکدیگر مقایسه کرد. در جدول ۳ فرایندهای مختلف تزریقی همراه با نیازهای اساسی هر فرایند

شکل ۱۲- فرایند قالبگیری تزریقی واکنشی اسفنجهای ساختاری پلی یورتان [3].

ارائه شده است. در بررسی مسئله از نقطه نظر متغیرهای فرایند و آثار آشکاری که بر کیفیت اسفنجهای ساختاری می گذارند موارد زیر را می توان یاد آور شد: پارامترهای فرایند، کاهش چگالی، زبری سطح، پارامترهای فرایند: پارامترهای اساسی که بر کیفیت محصول نهایی اثر می گذارند در فرایندهای مختلف متفاوت اند. به عبارتی، هر فرایند متغیرهای مربوط به خود را دارد که بر خواص قطعه نهایی تاثیر دارند. در

فرایند	نیازهای دستگاه	نیازهای قالب	کیفیت سطح	چگالی
تزریق فشار پایین	دستگاه قالبگیری تزریقی معمولی با افشانک یک طرفه، شیر یک طرفه یا دستگاه اکسترودر و مخزن مخصوص مجهز به یک یا چند افشانک	قالب آلومینیمی ساده، ضروری نیست که سطح قالب کیفیت بالایی داشته باشد	چوب مانند، زبری حدود ۲۰ میکرون در نقاط سطح با کمترین چگالی	کمترین چگالی در بین فرایندها، دستکم چگالی کاهش یافته برای پلیمرهای دارای پرکننده و تقویت کننده برابر با ۰/۴
تزریق فشار بالا	دستگاه قالبگیری تزریقی معمولی یا دستگاه تزریقی ویژه مجهز به یک افشانک و مخزن نیتروژن روی روغن	قالبهای فولادی به ویژه برای قسمتهای با حرکات کشویی، حرکات قالب هیدرولیکی یا مکانیکی و سطح قالب صاف باشد	پرداخت اندکی مات، خطوط جدا کننده، اسپلی به نواحی دریچه محدود می شود، زبری حدود ۱۰ میکرون	متوسط تا زیاد، بسته به مدت زمان باز شدن قالب. پوسته با ضخامت یکسان
تزریق با فشار معکوس گاز	دستگاه قالبگیری تزریقی فشار بالا یا پایین یا دستگاه تزریقی ویژه با سیستم قالبگیری سنگین، جریان و فشار گاز باید کنترل شود	حفره قالب باید خوب آب بندی شود. اجزاء با حرکات کشویی و پرانهای مجهز به o-ring	اندکی مات تا صاف، زبری حدود ۵ میکرون، خطوط جوش در پشت موانع جریان	زیاد، چگالی کاهش یافته ۰/۸۵-۰/۸، کنترل ضخامت پوسته مشکلتر از روش فشار بالاست
تزریق دو جزئی	دستگاه مجهز به دو واحد ذوب و تزریق، افشانک ویژه برای تغذیه دو پلیمر از راه کانال مشترک به قالب، شیرهای متناوب ویژه	قالب معمولی مناسب تزریق با کیفیت سطح بالا	خیلی صاف تا خیلی براق، مقداری اسپلی در نواحی دریچه و فرورفتگی در محیط قطعه	پوسته کاملاً مشخص، چگالی تابع میزان نزدیکی ویسکوزیته دو پلیمر و ضخامت دیواره قطعه، چگالی کاهش یافته ۰/۸۵-۰/۷

می آید تقریباً مشابه ضخامتی است که از فرایند قالبگیری تزریقی اسفنجهای دو جزئی به دست می آید. ضخامت پوسته را می توان به وسیله فشار گاز در داخل قالب یا به وسیله حرکت قالب کنترل کرد. شکل ۱۳ همچنین نشان می دهد که در فرایند فشار پایین پلیمرهای بی شکل، یک کاهش ملایم در چگالی اسفنج به سمت مغزه به وجود می آید ولی برای پلیمرهای بلوری پوسته نازکتری شکل می گیرد (۵ ب).

در اسفنجهای دو جزئی ضخامت پوسته را می توان با توجه به نسبت پلیمر اسفنجی و پلیمر غیراسفنجی کنترل کرد. در اسفنجهای دو جزئی ضخیمترین پوسته به وجود می آید و یک قطعه آن ممکن است بیشتر از ۲۵٪ اسفنج نداشته باشد، در حالی که در فرایندهای فشار

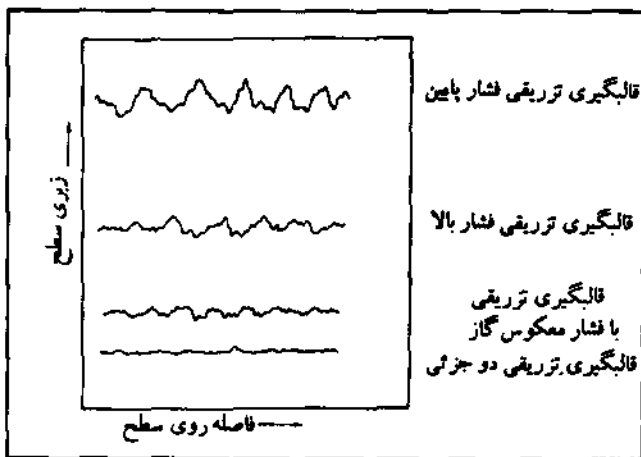
جدول ۴ پارامترهای اساسی هر فرایند و اثر آنها بر کیفیت محصول، ارائه شده است.

کاهش چگالی: اگر کمترین چگالی ممکن برای اسفنجهای ساختاری در نظر گرفته شود، آن گاه پارامترهای یاد شده در جدول ۴ را می توان برای توضیح تفاوت فرایندهای مختلف مورد استفاده قرار داد. همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، توزیع چگالی در عرض یک قطعه اسفنج ساختاری که توسط فرایندهای مختلف به دست می آید یکواخت نیست. محدودیتی عملی برای ضخامت پوسته وجود دارد که بستگی به خصوصیات رئولوژیکی مواد و میزان جریان آنها در درون قالب دارد. در فرایند با فشار معکوس گاز، ضخامت پوسته ای که به وجود

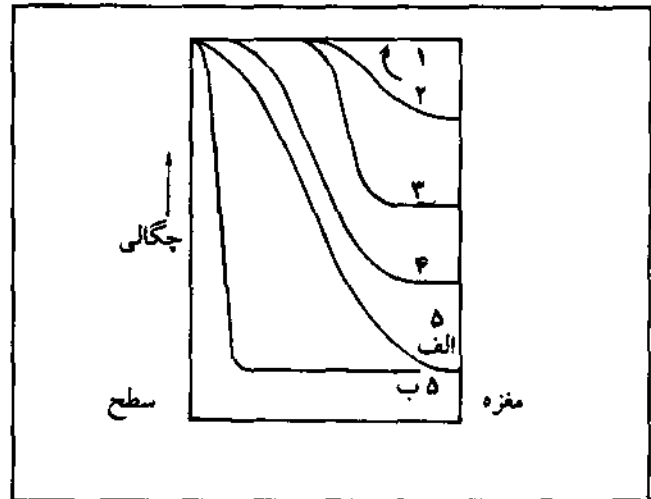
فرایند دو جزئی		فرایند با فشار معکوس گاز		قالبگیری تزریقی	
پایین بالا	گراژروی مذاب	بلند کوتاه	مدت زمان ترریق	بلند کوتاه	مدت زمان ترریق
بالا پایین	حجم مغزه	بالا پایین	چگالی	بالا پایین	چگالی
بلند کوتاه	مدت زمان ترریق	بلند کوتاه	مدت زمان ترریق	بلند کوتاه	مدت زمان ترریق
بالا پایین	چگالی	قابل ملاحظه کم	خطوط جوش	زبر صاف	کیفیت سطح
بلند کوتاه	مدت زمان ترریق	بالا پایین	دمای قالب	بالا پایین	دمای ذوب
مات براق	کیفیت سطح	قابل ملاحظه کم	خطوط جوش	زبر صاف	کیفیت سطح
بالا پایین	دمای قالب	خوب بد	آب بندی قالب	بالا پایین	دمای قالب
مات براق	کیفیت سطح	قابل ملاحظه وجود ندارد	خطوط سطح	زبر صاف	کیفیت سطح
کم زیاد	ضخامت مقطع	بالا پایین	فشار گاز	خوب بد	گازگیری
بالا پایین	چگالی	قابل ملاحظه وجود ندارد	خطوط سطح	بالا پایین	چگالی

اسفنجی است و این مطلب از نقطه نظر اقتصادی اهمیت دارد. بنابراین اگر چگالی پایین و سختی بالا مورد نظر بوده و کیفیت ظاهری سطح از اهمیت کمی برخوردار باشد، فرایند فشار پایین به مراتب بهتر از فرایند دو جزئی است.

زبری سطح: زبری سطح در فرایندهای مختلف تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. این پارامتر به طور اجمالی برای فرایندهای مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - نمودار اجمالی زبری سطح برای فرایندهای مختلف اسفنجهای ساختاری [2].



شکل ۱۳ - شکل توزیع چگالی که در فرایندهای مختلف به وجود می‌آید: (۱) قالبگیری تزریقی مواد معمولی، (۲) قالبگیری تزریقی با فشار معکوس گاز بدون خروج اسفنج، (۳) قالبگیری تزریقی دو جزئی، (۴) قالبگیری تزریقی با فشار معکوس گاز با خروج اسفنج، (۵ الف) قالبگیری تزریقی فشار پایین پلیمرهای بی شکل و (۵ ب) قالبگیری تزریقی فشار پایین پلیمرهای بلوری [2].

پایین، قطعاتی با کمترین چگالی تولید می‌شود و بیشتر از ۵۰٪ قطعه

بارن ژوستوس فون لیبیک (۱۸۷۳-۱۸۰۳) یکی از پیشگامان در زمینه شیمی آلی و پایه گذار علوم شیمی کشاورزی است.

ژوستوس لیبیک که در سال ۱۸۴۵ لقب افتخاری فون دریافت کرد در ۱۲ مه ۱۸۰۳ در دارمستاد متولد شد. پدرش یک فروشنده مواد دارویی بود که احتمالاً علاقه اولیه وی به شیمی از آنجا ناشی شد که در کودکی اجازه داشت با مواد شیمیایی در آزمایشگاه پدرش بازی کند. وی ابتدا در یک داروخانه شاگردی می کرد، ولی بعد از اینکه آزمایشهایش منجر به شکستن شیشه های اتاق پشت مغازه شد کارش را بلافاصله از دست داد. وی در این زمان ۱۵ سال داشت و تصمیم به فراگیری شیمی گرفت که تمام عمرش را در این راه صرف کرد.

لیبیک در بن وارلانگن به تحصیل شیمی پرداخت و در ۱۸۲۲ از ارلانگن دکترایش را گرفت. با وجود این، وی به این حد دانش و آموزش قانع نبود و به پاریس رفت که در آن هنگام مرکز مهمی برای پژوهش در زمینه شیمی به شمار می رفت. وی ابتدا در آزمایشگاه خصوصی یک شیمیدان به کار مشغول شد و از آنجا به آزمایشگاه ژوزف گیلوساک، کاشف قوانین گازها، منتقل شد. لیبیک از تابستان ۱۸۲۳ تا بهار ۱۸۲۴ در آنجا کار کرد.

هنگامی که لیبیک به دارمستاد برگشت حامل توصیه نامه های مؤثری از گیلوساک و الکساندر فون هامبولد بود و دولت هس بلافاصله وی را به عنوان استادیار شیمی در دانشگاه کوچک گیسن منصوب کرد. دو سال بعد وی به استادی رسید ولی در ۱۸۲۵ به مونیخ رفت و بقیه عمرش را آنجا سپری کرد.

وقتی لیبیک وارد گیسن شد آنجا را مدرسه کوچکی یافت که محقرانه برای آموزش شیمی آماده شده بود. وی چهره آنجا را تغییر داد و طی ۲۸ سال اقامت در آن دانشگاه، آنجا را به مرکز مطالعات شیمی جهان تبدیل کرد. از وی به عنوان یکی از بزرگترین استادان شیمی زمانه یاد می شود.

یکی از کارهایی که لیبیک در گیسن انجام داد حذف آموزش شیمی عملی، یعنی در مورد روشهای ساخت صابون، تقطیر الکل، ساخت رنگ و واکس و سایر روشهای شیمیایی بود. وی ادعا داشت که در تکنولوژی شیمیایی پیشرفتی حاصل نمی شود مگر اینکه بنیاد نظری محکمی گذاشته شود که توسط نسل جدید شیمیدانان کاملاً قابل درک باشد. لیبیک پیش بینی کرد که صنعت شیمیایی آلمان، با مطالعه علمی شیمی می تواند دستاوردهای بزرگی را از آن خود سازد و در نیمه دوم قرن نوزدهم ثابت شد که حق با وی بوده است.

لیبیک طی سالهایی که در گیسن بود همچنین رابطه صمیمانه ای با فردریک وولر داشت و همکاری آنها از مشخصترین و پر بارترین وقایع تاریخ علم به شمار می رود. آنها در ۱۸۲۴ هنگامی که لیبیک از بقیه در صفحه ۴۸

اسفنجهای ساختاری بیشتر از گرماترما تهیه می شوند و ساختار ویژه ای شامل مغزهای متخلخل و اسفنجی و پوسته ای جامد و غیر قابل تفکیک دارند. وجود گرادیان چگالی از مغزه تا پوسته از ویژگیهای بارز این اسفنجهاست.

اسفنجهای ساختاری با استفاده از پف دهنده های فیزیکی مانند کلروفلوئوروکربنها، نیتروژن و هوا و انواع شیمیایی مانند ADCA تولید می شوند و در مقایسه با اسفنجهای معمولی با چگالی مشابه می توانند خواص مکانیکی بهتری داشته باشند.

مهمترین روش تهیه و شکل دهی اسفنجهای ساختاری فرایند قالبگیری ترریقی است که به چهار نوع مختلف ترریق فشار پایین و بالا، تزریق با فشار معکوس گاز و تزریق دو جزئی تقسیم می شود. دستگاههای مورد استفاده از نوع ماشینهایی ترریقی متداول دارای اجزای ویژه یا دستگاههای ترریقی ویژه می باشند. در هر چهار نوع امکان کنترل کیفیت سطح و ضخامت پوسته و چگالی وجود دارد.

بهترین کیفیت سطح (پایین زبری) با استفاده از فرایند ترریق دو جزئی به دست می آید، به ویژه زمانی که دمای قالب بالا و مدت زمان ترریق مواد به درون قالب کوتاه باشد. ولی، این روش ضخیمترین پوسته را نیز به وجود می آورد و کاهش چگالی از راه کاهش مدت زمان ترریق و افزایش سطح مقطع قطعه ممکن می شود. روش تزریق فشار پایین، پایتترین چگالی را به ویژه در مورد گرماترماهای بی شکل سبب می شود و کاهش بیشتر چگالی را می توان با انتخاب مدت زمان ترریق کوتاه و گازگیری خوب به دست آورد.

REFERENCES

- [1] Hilyard, N.C., "Mechanics of Cellular Plastics", Applied Science Publishers, London, 1982.
- [2] Shutov, F.A., "Integral/Structural Polymer Foams", Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [3] Mark, H.F., "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", Vol. 15, PP. 771-797, John Wiley and Sons, New York, 1989.