Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۲، ص‌ص ۴۷-۵۴

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی تأثیر پارامترهای ساخت بر خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی اپوکسی/ میکروبالن سرامیکی

حامد احمدی[۱]، غلامحسین لیاقت[۲*]، محمود مهرداد شکریه[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵، ghlia530@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۲
پذیرش: ۰۹ تیر ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:
فوم ترکیبی
خواص مکانیکی
اپوکسی
میکروبالن سرامیکی

چکیده

فوم‌های ترکیبی، کامپوزیت‌های متشکل از ماتریس پلیمری و میکروبالن‌های توخالی‌اند. آنها با داشتن وزن پایین نسبت به پلیمر خالص ماتریسشان، مقاومت مکانیکی نسبتاً متناسبی دارند. داشتن مقاومت مکانیکی بالا مستلزم ساخت قطعات با روش مناسب است. در این مقاله با استفاده از رزین اپوکسی و یک نوع میکروبالن سرامیکی، ۳۶ نوع فوم ترکیبی ساخته شده و تأثیر پارامترهای ساخت این فوم‌ها از جمله سرعت اختلاط، زمان اختلاط، ترتیب اختلاط اجزا و همچنین تأثیر حباب‌زدایی با آون خلأ در مقاومت مکانیکی آنها مورد تحقیق قرار گرفته است. همچنین میزان شناوری میکروبالن‌ها در ماتریس و میزان تخلخل کنترل نشده، که باعث کاهش استحکام فوم نهایی می‌شوند، نیز بررسی شده‌اند. نتایج نشانگر آن است که سرعت و ترتیب اختلاط اجزا در میزان مقاومت فوم ترکیبی اثر چندانی ندارد گرچه زمان لازم برای اختلاط اجزا، برای درصدهای متفاوت از میکروبالن در ماتریس، متفاوت خواهد بود. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش شناوری میکروبالن‌ها و افزایش تخلخل ناخواسته در فوم، از مقاومت مکانیکی فوم کاسته می‌شود. استفاده از آون خلأ پیش از قالب‌گیری فوم‌های با درصد حجمی بالای ۴۰٪ سبب کاهش درصد تخلخل فوم شده و استحکام محصول نهایی را افزایش می‌دهد.

Experimental investigation of fabrication parameters' effects on the mechanical properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foams

Hamed Ahmadi[1], Gholamhossein Liaghat[1*], Mahmoud Mehrdad Shokrieh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 April 2013
Accepted 30 June 2013
Available Online 12 April 2014

Keywords:
Syntactic Foam
Mechanical Properties
Epoxy
Ceramic Microballoon

ABSTRACT

Syntactic foams are a kind of composite; consist of polymeric matrix and hollow micro-balloons. They have high strength to weight ratio related to neat matrix material. In this paper epoxy resin as matrix and ceramic micro-balloons are used and 36 kinds of syntactic foam were fabricated to investigate the effect of preparation factors such as: mixing speed, mixing time, mixing sequence and extracting bubbles by a vacuum oven on the mechanical properties. Also, two undesirable events like micro-balloon flotation in matrix and porosity are investigated as they affect the foam`s strength. The results show that the speed and sequence of mixing are not effective seriously. However the time needed for mixing would be changed for different volume percent of micro-balloons. It should be noted that as flotation and porosity increases the compression strength decreases. Using the vacuum pressure before molding may decrease the matrix porosity.

۱- مقدمه

تلاش‌های محققان همیشه در جهت کشف و خلق موادی بوده است که علاوه بر داشتن استحکام بالا، سبک‌تر و ارزان‌تر باشند. در بسیاری از کاربردها خواص مکانیکی مخصوص[1] (خواص مکانیکی بر حسب وزن ماده) بسیار مهم‌تر از خواص مطلق بدون در نظر گرفتن وزن می‌باشد. کامپوزیت‌های پلیمری که با الیاف تقویت شده‌اند نمونه‌ای از این مواد هستند. البته اگرچه این مواد خواص مکانیکی مخصوص مناسبی دارند ولی گاهی و در بعضی کاربردها به کاهش وزن بیشتری نیاز است. در این مسیر ایجاد حفره‌های پر شده از هوا یا گازهای خنثی در داخل ماتریس پلیمری یا در واقع تولید فوم، مد نظر بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

در تولید فوم‌های مرسوم، معمولاً با دمیدن گاز یا عوامل شیمیایی در داخل ماتریس مذاب حفره‌ها[2] را ایجاد می‌کنند. وجود حفره به صورت ذاتی

1- Specific Mechanical Properties

2- Porosity

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Ahmadi, Gh.Ho. Liaghat, M. M. Shokrieh, Experimental investigation of fabrication parameters' effects on the mechanical properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foams, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 47-54, 2014 (In Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

عیب محسوب شده و از مقاومت ماده می‌کاهد. زیرا که یک حفره مکان مناسبی برای ایجاد و رشد ترک در داخل ماده است. با در نظر گرفتن این دیدگاه، اگر حفره گازی با دیواره‌ای پوشش داده شود، تا حدی از کاهش استحکام کاسته خواهد شد. این همان خصوصیتی است که یک میکروبالن[1] دارد. میکروبالن‌ها گوی‌هایی در ابعاد چند ده میکرون با دیواره‌ای از جنس شیشه یا سرامیک یا پلیمر و یا فلز هستند که داخل آنها گازی خنثی وجود دارد. با ترکیب این مواد در ماتریس پلیمری یا فلزی، موادی سبک‌تر بدست می‌آیند که به آنها فوم ترکیبی[2] گفته می‌شود [۱]. در این مقاله تمرکز اصلی بر روی ماتریس پلیمری است و فوم ترکیبی با ماتریس پلیمری به اختصار همان فوم ترکیبی گفته می‌شود.

تعیین خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی مورد توجه محققان بسیاری بوده است. یکی از مهم‌ترین این خواص، استحکام مناسب در برابر فشار و جذب رطوبت پایین است. از این‌رو فوم‌های ترکیبی برای اولین بار در سازه‌ها و تجهیزاتی بکار برده شدند که در عمق دریا غوطه‌ور هستند [۲،۳].

به تدریج تحقیقات روی این ماده سبک ولی مقاوم افزایش پیدا کرد تا دامنه کاربرد آن نیز گسترش یابد. کومار و همکاران [۴] امکان استفاده از این ماده در سازه‌های هوایی را بررسی کرده‌اند. گوپتا و همکاران [۵]، و تاگلیاویا و همکاران [۶] خواص پانل‌های ساندویچی و کامپوزیتی را بررسی نموده‌اند که از فوم ترکیبی در هسته آنها استفاده شده بود. از این پانل‌ها می‌توان در سازه‌های دریایی یا زیردریایی استفاده کرد. از این دست تحقیقات در زمینه استفاده از این فوم‌ها در سازه‌ها بسیار انجام شده است. در حالت کلی می‌توان عنوان کرد که این مواد با در نظر گرفتن عامل وزن، مدول الاستیک [۷،۸]، سفتی شکست [۹]، مقاومت پس از ضربه [۱۰] بالایی داشته و مقاومت قابل قبولی در برابر رسانش گرمایی [۱۱] دارند. نتایج عنوان شده به صورت خاص به عواملی همچون درصد حجمی میکروبالن‌ها در ماتریس، اندازه میکروبالن‌ها، ضخامت دیواره میکروبالن‌ها و یا نوع آنها نیز وابسته است.

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در میزان خواص مکانیکی فوم ترکیبی، نحوه تعامل دوسویه میکروبالن با ماتریس است. از آنجا که اختلاط میکروبالن با ماتریس پلیمری به شکل کاملا مکانیکی است؛ اگر اختلاط مناسبی صورت نگیرد، خواص مکانیکی به میزان قابل توجهی کاهش خواهند یافت [۱۲،۱۳]. از این‌رو نحوه تولید فوم ترکیبی یکی از مسائل مهم مورد بررسی خواهد بود.

روش‌های ساخت فوم‌های ترکیبی که در اکثر مقالات ذکرشده، همگی مبتنی بر مخلوط کردن ساده و ابتدایی تمامی اجزا با هم و نهایتاً قالب‌گیری مخلوط نهایی است [۱۴-۱۷]. در نگاه اول این موضوع ساده به نظر می‌آید ولی در عمل مشکلاتی پیش روی تولید خواهد بود. در بیشتر موارد و در فوم‌های با درصد حجمی بالای میکروبالن، مثلا ۵۰ یا ۶۰ درصد، ویسکوزیته مخلوط آنقدر بالا می‌رود که هم‌زدن به راحتی صورت نمی‌گیرد. از طرفی بعضی محققان نگران آسیب دیدن میکروبالن ها در هنگام هم‌زدن هستند از این رو توصیه می‌کنند تا مخلوط به آرامی هم زده شود [۱۷]. از طرف دیگر بعضی محققان پیشنهاد می‌کنند مخلوط با هم‌زن سرعت بالا همزده شود تا اختلاط کامل صورت گیرد [۱۴].

ترتیب اختلاط اجزای نیز در بسیاری موارد متفاوت گزارش شده است. بعضی افراد مانند گوپتا و همکاران [۳] ابتدا مخلوط رزین و هاردنر را تهیه کرده و سپس میکروبالن را به آن اضافه می‌کنند. در حالی که تاگلیاویا و همکاران [۶] بر اختلاط رزین و میکروبالن در ابتدا تأکید کرده‌اند.

1- Micro-Balloon
2- Syntactic Foam

با توجه به موارد ذکر شده در بالا، در این مقاله سعی بر آن است که راه‌های مختلف تولید را آزموده و بهترین راه که منجر به تولید فوم با مقاومت و استحکام بالاتر می‌شود، معرفی شود. در این مقاله با استفاده از یک نوع میکروبالن سرامیکی و رزین اپوکسی، سه نوع فوم ترکیبی ساخته شده است که میزان میکروبالن آنها ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ از کل حجم فوم می‌باشد. برای ساخت این سه نوع فوم، از ۹ روش مختلف استفاده شده است تا تأثیر پارامترهای ساخت مانند سرعت و ترتیب اختلاط و همچنین حباب‌زدایی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در یک نوع آن مدت اختلاط نهایی اجزا در ۴ زمان مختلف انجام شده تا اثر ویسکوزیته ترکیب قبل از قالب‌گیری که با گذشت زمان و بواسطه واکنشهای پلیمریزاسیون افزایش می‌یابد نیز بررسی شود. در مجموع برای مقایسه ۳۶ نوع فوم تولیدی از ۳ پارامتر میزان فلوتاسیون[3] یا شناوری میکروبالن در ماتریس، میزان تخلخل[4] ناخواسته و مقاومت فشاری[5] استفاده شده است. نتایج نهایی برحسب نحوه تهیه فوم ارائه شده است.

۲- روش ساخت و مواد اولیه

۲-۱- مواد اولیه

برای ساخت فوم ترکیبی از میکروبالن سرامیکی با نام تجاری WM ساخت شرکت آلمانی اُمگامینرال[6] استفاده شده است. قطر متوسط این میکروبالن در حدود ۱۷۰ میکرون، درصد ضخامت دیواره آن نسبت به قطر درحدود ۱۰٪ و چگالی مؤثر آن تقریباً ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

برای جزء پلیمری از اپوکسی با نام تجاری اپیکوت۸۲۸ [7] از شرکت رزولوشن[8] و هاردنر با نام تجاری تری‌اتیلن‌تترا‌آمین[9] (تِتا[10]) از خانواده هاردنرهای آمینی از شرکت آکزونوبل[11] با درصد ترکیبی ۱۰:۱ استفاده شده است. اپی‌کوت ۸۲۸ رزینی سردکار از خانواده اپوکسی با گرانروی متوسط متشکل از بیسفنول A و اپی کلروهیدرین می‌باشد. چگالی ترکیب این دو جزء یا همان رزین خالص پخت شده طبق استاندارد ASTM C271 محاسبه شده و میزان این چگالی ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

۲-۲- روش‌های ساخت

برای ساخت نمونه‌های فوم ترکیبی با ماتریس پلیمری نمونه‌هایی با درصد حجمی ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ درصد ساخته و آزمایش شده‌اند. نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است که حداکثر میزانی که میتوان میکروبالن را در ماتریس اپوکسی ترکیب کرد، ۶۵٪ از کل حجم فوم می‌باشد [۱]. بنابراین انتخاب این سه درصد متفاوت می‌تواند کل دامنه تغییرات حجمی میکروبالن در ماتریس را پوشش دهد. اگر دو عامل ترتیب و سرعت اختلاط اجزاء مد نظر قرار گرفته شوند، می‌توان سه روش کلی در نظر گرفت. در کنار آن اگر برای هر روش تأثیر حباب‌زدایی قبل یا بعد از قالب‌گیری یا حذف آن از پروسه ساخت نیز در نظر گرفته شود، سه روش فرعی به هرکدام از روش‌های اصلی افزوده می‌شود. بنابراین در مجموع از ۹ روش زیر در ساخت نمونه‌ها استفاده می‌شود:

A1) اختلاط رزین و میکروبالن به روش هم‌زدن دستی، افزودن هاردنر، قالب‌گیری

3- Flotation
4- Porosity
5- Compressive Strength
6- Omeganinearl Ltd. Co.
7- Epikote 828
8- Resolution
9- Triethylenetetramine
10- Teta
11- Akzonobel

www.SID.ir

Archive of SID

A2) اختلاط رزین و میکروبالن به روش هم‌زدن دستی، افزودن هاردنر، حباب‌زدایی با آون خلأ، قالب‌گیری
A3) اختلاط رزین و میکروبالن به روش هم‌زدن دستی، افزودن هاردنر، قالب‌گیری، حباب زدایی با آون خلأ
B1) اختلاط رزین و میکروبالن با هم‌زن سرعت بالا، افزودن هاردنر، قالب‌گیری
B2) اختلاط رزین و میکروبالن با هم‌زن سرعت بالا، افزودن هاردنر، حباب‌زدایی با آون خلأ، قالب‌گیری
B3) اختلاط رزین و میکروبالن با هم‌زن سرعت بالا، افزودن هاردنر، قالب‌گیری، حباب زدایی با آون خلأ
C1) اختلاط رزین و هاردنر، افزودن میکروبالن و هم‌زدن دستی، قالب‌گیری
C2) اختلاط رزین و هاردنر، افزودن میکروبالن و هم‌زدن دستی، حباب‌زدایی با آون خلأ، قالب‌گیری
C3) اختلاط رزین و هاردنر، افزودن میکروبالن و هم‌زدن دستی، قالب‌گیری، حباب‌زدایی با آون خلأ

همچنین مدت زمان هم‌زدن نهایی قبل از قالب‌گیری برای روش اول در ۴ زمان ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه و برای هر سه درصد حجمی انجام می‌شود. به این ترتیب تأثیر میزان ویسکوزیته مخلوط قبل قالب‌گیری بر خواص نهایی نیز بررسی می‌شود. البته اگرچه پس از اختلاط رزین و هاردنر، زمان کار با رزین و قالب‌گیری در حدود ۹۰ دقیقه خواهد بود، ولی زمان زیاد هم زدن نیز جزئی از هزینه‌هاست که در صورت لزوم بایستی کاهش یابد. از این‌رو بدست آوردن حداقل زمان لازم برای اختلاط نهایی می‌تواند به افزایش سرعت ساخت کمک کند. همچنین توجه شود که ۴ متغیر این آزمایش‌ها از نظر ماهیت کاملاً مستقل محسوب می‌شوند.

در مجموع ۳۶ سری نمونه بدست می‌آید که اثر ترتیب اختلاط، حباب‌زدایی، ویسکوزیته مخلوط قبل قالب‌گیری و میزان درصد حجمی میکروبالن در استحکام فوم تولید شده بدست می‌آید. متغیرهای مورد مطالعه و سطوح تغییر آنها در جدول ۱ به اختصار آمده است.

تمامی نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر ریخته می‌شوند و تا ۲۴ ساعت بعد از قالب‌گیری در دمای اتاق باقی می‌مانند تا کاملاً پخت شده و پیوندهای بین رزین و هاردنر تشکیل شود. آزمایش‌های مکانیکی روی نمونه‌ها پس از ۷ روز انجام خواهد شد تا از خشک شدن کامل آنها اطمینان حاصل شود.

۳-۲- کدگذاری نمونه‌ها

برای نام‌گذاری هر سری از نمونه‌ها از یک کد که شامل دو حرف و سه جفت عدد دو رقمی به شکل SF-A1-22-33 استفاده شده است. دو حرف اول لاتین معرف کلمه فوم ترکیبی، دو رقم اول نشان‌دهنده یکی از ۹ روش ساخت، دو رقم دوم نشان دهنده درصد حجمی میکروبالن و دو رقم سوم نشان دهنده میزان زمان هم‌زدن نهایی است. مثلاً فوم با کد SF-B3-40-40 مشخصه فومی است که به روش B3 ساخته شده، ۴۰٪ حجمی میکروبالن دارد و زمان هم‌زدن نهایی آن ۴۰ دقیقه است.

۳- فاکتورهای آزمایش کمی و کیفی نمونه‌ها

برای ارزیابی نهایی قطعات ساخته شده، ۳ عامل میزان شناوری میکروبالن‌های روی سطح، میزان تخلخل ناخواسته و مقاومت فشاری بررسی شده‌اند.

۳-۱- میزان شناوری

در فوم‌های با درصد پایین میکروبالن، قبل از پخت شدن ماتریس اپوکسی که ویسکوزیته ماتریس پایین است، امکان اینکه میکروبالن‌ها به سبب سبکی روی سطح ماتریس شناور شوند وجود دارد. در این حالت در پایین نمونه اپوکسی خالص و در بالای نمونه، فومی با درصد حجمی بیش از آنچه مدنظر است وجود خواهد داشت. این به معنای آن است که فوم مورد نظر دارای خصوصیات مورد انتظار نخواهد بود. از این‌رو برای یافتن روشی که شناوری در آن حداقل باشد؛ پس از پایان پخت و خشک شدن نمونه، نسبت اختلاف کل ارتفاع و اندازه‌ای که میکروبالن‌ها در آن شناور شده و روی سطح آمده‌اند به کل ارتفاع، به عنوان میزان شناوری در نظر گرفته می‌شود. هر چه این میزان به صفر نزدیک باشد، نشانگر این است که نمونه یکنواخت‌تر است.

۳-۲- میزان تخلخل

از آنجا که تولید فوم ترکیبی حاصل اختلاط چند جزء و هم‌زدن آنها به صورت مکانیکی است، وجود حباب هوا در بین مواد کاملاً طبیعی و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد [۳،۵،۶]. این حباب‌های هوا به عنوان تخلخل ناخوسته شناخته می‌شوند. هر چه میزان این حباب‌ها کمتر باشد، کیفیت فوم تولیدی بالاتر است. برای مقایسه فوم‌ها از نظر میزان حبابهای ناخواسته از فاکتور درصد حجمی حباب استفاده می‌شود. این فاکتور به شکل فرمول (۱) در پژوهش‌های قبلی عنوان شده است [۵،۶].

$$\phi_{\mathrm{p}} = 1 - \frac{\rho_{\exp}}{\rho_{\mathrm{th}}} \qquad (۱)$$

$\rho_{\exp}$ چگالی واقعی فوم تولید شده است که با استفاده از استاندارد ASTM C271 محاسبه می‌شود. طبق استاندارد اندازه‌های ۳ نمونه از هر سری که به شکل استوانه ساخته شده‌اند، با دقت ۰/۲ میلی‌متر مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. وزن نمونه‌ها نیز با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شده است. ρ_{th} چگالی تئوری است که از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲].

$$\rho_{\mathrm{th}} = \varphi \rho_{\mathrm{mb}} + (1-\varphi)\rho_{\mathrm{m}} \qquad (۲)$$

در این رابطه ρ_{mb} چگالی موثر میکروبالن و ρ_{m} چگالی ماتریس پلیمری است.

۳-۳- میزان مقاومت فشاری

پژوهش محققان پیشین بر روی میزان مقاومت و استحکام فوم‌های ترکیبی نشانگر آن است که در مواردی وجود میکروبالن در ماتریس اپوکسی باعث افزایش و در بعضی موارد باعث کاهش استحکام می‌شود. دلیل عمده این تفاوت‌ها را می‌توان در تفاوت بین پروسه‌های تولید بیان کرد [۲]. اگر سطح میکروبالن به ماتریس اپوکسی خوب چسبیده شده باشد، امکان ایجاد یا رشد ترک از مرز بین میکروبالن و اپوکسی به حداقل می‌رسد و گاهی نیز ترکها در هنگام رشد به سد میکروبالن‌ها برخورد کرده و رشد نخواهند کرد. حال اگر اتصال میکروبالن و اپوکسی به درستی شکل نگرفته باشد، مرز بین سطح میکروبالن و اپوکسی فضای مناسبی برای ترک‌ها است که ایجاد شده یا رشد کنند. از این‌رو برای بررسی نحوه رفتار فوم و کنش بین میکروبالن و ماتریس نمونه‌های ساخته شده مطابق با استاندارد ASTM D695 تحت آزمون فشاری قرار گرفته و استحکام فشاری آنها تحقیق شده است.

۴- نتایج و بحث روی آنها

نتایج حاصل از آزمایش‌ها مبنی بر میزان شناوری، میزان تخلخل و مقاومت فشاری در جدول‌های ۱ تا ۳ مشاهده می‌شود. بحث در مورد نتایج بر حسب معیار مورد بررسی در ادامه آمده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۱- میزان شناوری

نتایج موجود در جداول ۱ تا ۳ نشان می‌دهند که میزان شناوری برای نمونه‌های ۶۰ درصد برابر صفر است. به این معنا که فوم‌ها با این درصد حجمی میکروبالن با هر روشی که ساخته شوند، مشکل شناور شدن میکروبالن روی سطح رزین را نخواهند داشت. البته دلیل این امر نیز واضح است. با افزایش درصد حجمی میکروبالن، ترکیب ویسکوزیته بالایی داشته و کاملاً شکل خمیری به خود می‌گیرد. این ویسکوزیته بالا عملاً اجازه شناوری به میکروبالن‌ها را نخواهد داد. عکس این موضوع در نمونه‌هایی دیده می‌شود که درصد حجمی میکروبالن آنها کم است. در این نمونه‌ها ویسکوزیته ترکیب در حدی است که میکروبالن‌ها بتوانند در آن شناور شوند. به طور کلی شناوری در هر حدی که باشد عیب محسوب می‌شود. زیرا با وجود این پدیده فوم یکنواختی ساخته نخواهد شد؛ درصد حجمی از قسمت بالایی تا پایینی متفاوت بوده و خواص مورد انتظار بدست نخواهد آمد.

تصاویر شکل ۱ و نمودار شکل ۲ میزان شناوری را برای ۳ نمونه با درصد حجمی میکروبالن ۲۰٪ و ۴۰٪ و ۶۰٪ نشان می‌دهند. هر سه این نمونه ها با روشA1 و قالب‌گیری پس از ۳۰ دقیقه اختلاط نهایی ساخته شده اند.

نمودار شکل ۳، تفاوت در ۹ روش تولیدی برای فوم ترکیبی با ۲۰٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه هم‌زدن را نشان می‌دهد.

جدول ۱ نتایج حاصل برای فوم ۲۰٪

نوع فوم	میزان شناوری	میزان تخلخل (٪)	مقاومت فشاری (MPa)
SF-A1-20-30	۰/۴۵	۱/۰۳	۴۹/۶
SF-A1-20-45	۰/۱۲	۱/۱۲	۵۷/۱
SF-A1-20-60	۰/۰۵	۱/۲۴	۵۹/۴
SF-A1-20-75	۰/۰۱	۱/۳۵	۵۸/۷
SF-A2-20-45	۰/۲۰	۱/۰۳	۵۵/۸
SF-A3-20-45	۰/۲۳	۱/۰۱	۵۶/۴
SF-B1-20-45	۰/۱۲	۱/۱۰	۵۹/۷
SF-B2-20-45	۰/۱۹	۱/۰۲	۵۶/۲
SF-B3-20-45	۰/۲۴	۰/۹۹	۵۷/۰
SF-C1-20-45	۰/۱۵	۱/۱۵	۵۹/۷
SF-C2-20-45	۰/۲۳	۱/۰۵	۵۶/۱
SF-C3-20-45	۰/۲۸	۱/۰۴	۵۵/۲

جدول ۲ نتایج حاصل برای فوم ۴۰٪

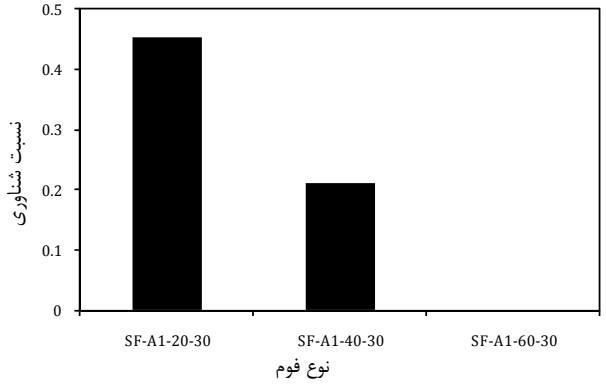
نوع فوم	میزان شناوری	میزان تخلخل (٪)	مقاومت فشاری (MPa)
SF-A1-20-30	۰/۲۱	۲/۵۲	۴۸/۲
SF-A1-20-45	۰/۰۸	۳/۱۰	۵۳/۷
SF-A1-20-60	۰/۰۱	۳/۶۳	۵۲/۵
SF-A1-20-75	۰/۰۰	۴/۱۴	۵۳/۱
SF-A2-20-45	۰/۰۹	۲/۰۱	۵۲/۱
SF-A3-20-45	۰/۰۹	۱/۹۵	۵۲/۵
SF-B1-20-45	۰/۰۷	۲/۸۷	۵۳/۵
SF-B2-20-45	۰/۰۸	۲/۰۵	۵۳/۰
SF-B3-20-45	۰/۰۹	۱/۹۱	۵۴/۱
SF-C1-20-45	۰/۰۶	۳/۰۴	۵۱/۳
SF-C2-20-45	۰/۰۸	۲/۲۳	۵۲/۱
SF-C3-20-45	۰/۰۸	۲/۳۸	۵۴/۱

جدول ۳ نتایج حاصل برای فوم ۶۰٪

نوع فوم	میزان شناوری	میزان تخلخل (٪)	مقاومت فشاری (MPa)
SF-A1-20-30	۰/۰۰	۱۰/۳۴	۴۰/۹
SF-A1-20-45	۰/۰۰	۱۱/۵۵	۳۵/۲
SF-A1-20-60	۰/۰۰	۱۳/۱۲	۴۰/۳
SF-A1-20-75	۰/۰۰	۱۵/۱۳	۳۹/۳
SF-A2-20-45	۰/۰۰	۱۰/۱۲	۴۰/۰
SF-A3-20-45	۰/۰۰	۹/۶۸	۳۹/۴
SF-B1-20-45	۰/۰۰	۱۰/۵۴	۳۶/۰
SF-B2-20-45	۰/۰۰	۹/۳۱	۳۹/۱
SF-B3-20-45	۰/۰۰	۱۰/۱۴	۳۸/۹
SF-C1-20-45	۰/۰۰	۱۲/۱۰	۳۴/۰
SF-C2-20-45	۰/۰۰	۱۱/۲۳	۳۷/۲
SF-C3-20-45	۰/۰۰	۱۱/۸۱	۳۷/۳

الف) ۲۰٪ ب) ۴۰٪ ج) ۶۰٪

شکل ۱ تصاویر فوم‌های ترکیبی ساخته شده با روش A1 و قالب‌گیری پس از ۳۰ دقیقه اختلاط نهایی

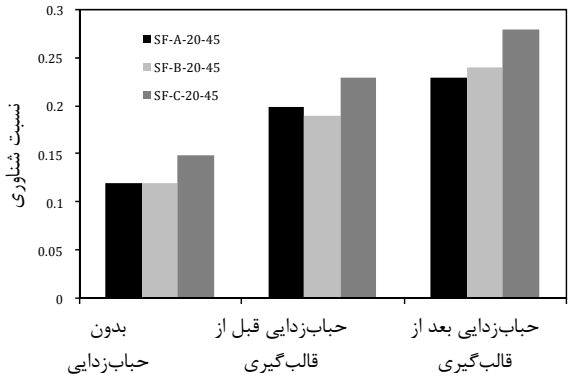


شکل ۲ نمودار شناوری برای سه فوم ساخته شده به روش A1 و با سه درصد حجمی متفاوت

نتایج این نمودار حاکی از آن است که عملیات حباب‌زدایی توسط آون خلأ در هر سه روش اصلی باعث افزایش میزان شناوری خواهد شد. بدون شک در هر روش تولیدی بواسطه اختلاط مکانیکی اجزاء، مقداری حباب هوا در ماتریس اپوکسی گیر خواهد کرد. آون با ایجاد خلأ در سطح نمونه باعث می‌شود که حبابها به سطح آیند. حرکت حبابهای هوا به سمت سطح رزین به شناوری میکروبالن‌ها کمک کرده و میزان آن را تشدید می‌کند. بنابراین استفاده از آون خلأ برای حباب‌زدایی از ماده پلیمری تولید شده اگرچه در بسیاری موارد توصیه شده ولی برای فوم ترکیبی با درصد حجمی کم میکروبالن، مفید نخواهد بود. از طرفی نتایج نشان می‌دهند تفاوت چندانی بین سه روش اصلی وجود ندارد. این بدان معناست که ترتیب اختلاط یا سرعت هم زدن، تأثیری در میزان شناوری نخواهد داشت.

www.SID.ir

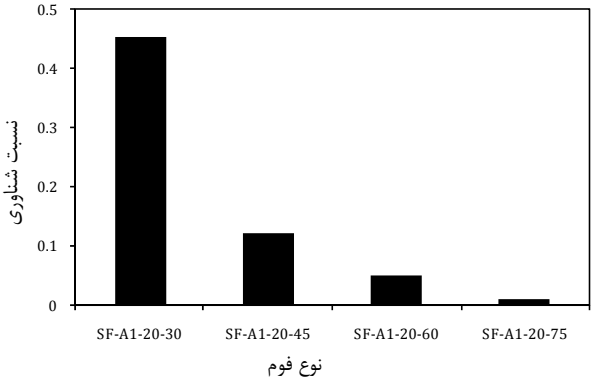
Archive of SID



شکل ۳ میزان شناوری در ۹ فوم تولیدی به ۹ روش مختلف با ۲۰ ٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه همزدن نهایی

الف) ۳۰ دقیقه ب) ۴۵ دقیقه ج) ۶۰ دقیقه د) ۷۵ دقیقه

شکل ۴ تصاویر فوم‌های ترکیبی ساخته شده با روش A1 و ۲۰٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری با زمان‌های متفاوت پس از همزدن



شکل ۵ نمودار میزان شناوری برای چهار فوم ساخته شده به روش A1 و با ۲۰٪ درصد حجمی میکروبالن و قالب‌گیری در زمان‌های متفاوت پس از همزدن

عامل بعدی مورد بحث زمان همزدن قبل از قالب‌گیری است. در واقع این زمان همزدن به نوعی نشانه‌ای از ویسکوزیته ترکیب قبل از قالب‌گیری است. تعیین ویسکوزیته خود زمان‌بر بوده و نیازمند دستگاه‌های آزمایش دیگری است ولی مدت زمان ذکر شده معیاری ساده و در دسترس است. در همزدن نهایی، هرچه به انتهای زمان ژل بودن ماتریس اپوکسی نزدیک شود، ویسکوزیته ماتریس بیشتر می‌شود. افزایش ویسکوزیته اگرچه عمل اختلاط را مشکل‌تر می‌کند ولی شناوری میکروبالن‌ها را نیز کمتر خواهد کرد. تصاویر شکل ۴ نمونه‌های فوم با ۲۰ درصد حجمی میکروبالن که با روش A1 ساخته شده‌اند و در ۴ زمان متفاوت ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه پس از همزدن نهایی قالب‌گیری شده‌اند، را نشان می‌دهد. نتایج نمودار شکل ۵ حاکی از آن است که هرچه میزان همزدن قبل از قالب‌گیری بیشتر باشد، تا این که مخلوط ماتریس و میکروبالن به شکل خمیری درآید، اثر شناوری به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. البته لازم به ذکر است هرچه درصد حجمی میکروبالن بیشتر شود، مخلوط زودتر به این حالت خواهد رسید.

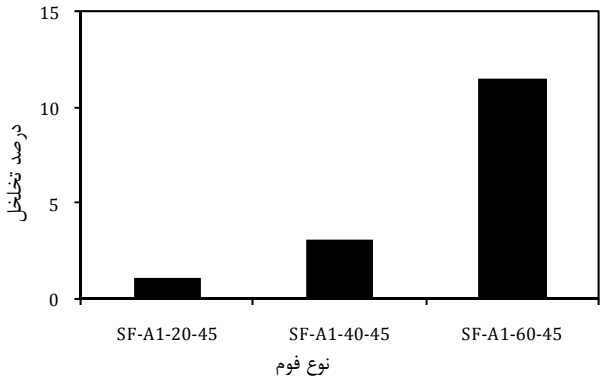
۴-۲- میزان تخلخل

همان‌طور که در قبل نیز بیان شد، وجود تخلخل و حباب هوای ناخواسته به سبب همزدن مکانیکی اجزای فوم، امری طبیعی و اجتناب‌ناپذیر است. میزان درصد حجمی حباب هوای ناخواسته یا فاکتور $\mathbf{p}$ در فوم‌های تولید شده، بدست آمده که نتایج آن به شرح زیر است.

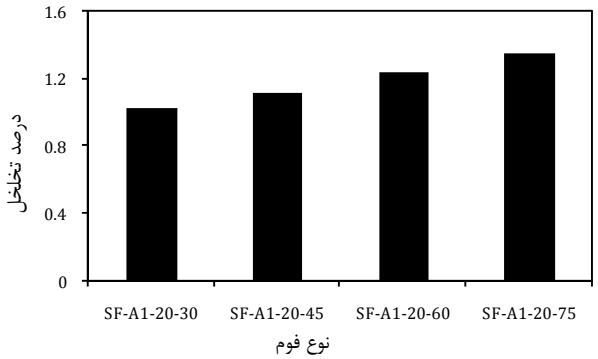
نمودار شکل ۶ درصد تخلخل در فوم‌های تولید شده به روش A1 و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه همزدن نهایی برای سه نمونه با درصدهای حجمی ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ را نشان می‌دهد. نتایج حاصل به وضوح نشان می‌دهد که هرچه درصد حجمی میکروبالن در ماتریس بیشتر باشد، میزان تخلخل نیز افزایش می‌یابد.

علت افزایش میزان تخلخل با افزایش درصد حجمی میکروبالن‌ها را می‌توان در افزایش ویسکوزیته فوم قبل از قالب‌گیری دانست. همین موضوع در مدت زمان همزدن نهایی قبل از قالب‌گیری نیز مشاهده می‌شود. در این مورد هر چه به انتهای زمان ژل شدن ماتریس پلیمری نزدیک شود، ویسکوزیته مخلوط بالاتر رفته و امکان آزاد شدن حباب‌های ناشی از همزدن سخت‌تر خواهد شد. از نتایج نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ که برای دو فوم با درصدهای حجمی ۲۰٪ و ۶۰٪ در زمان‌های متفاوت قالب‌گیری نشان داده شده است، این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که هر چه میزان همزدن قبل از قالب‌گیری بیشتر باشد، میزان حباب هوای داخل فوم نیز بیشتر می‌شود. البته این تغییر برای میزان کم درصد حجمی میکروبالن‌ها ناچیز خواهد بود ولی هرچه درصد حجمی بالاتر رود، قالب‌گیری باید زودتر انجام شود.

یکی از مؤثرترین کارها در خارج کردن حباب هوا از ماتریس قبل از پخت‌شدن، استفاده از آون خلأ است.



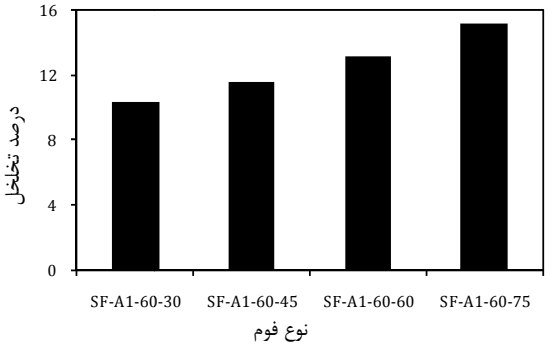
شکل ۶ نمودار میزان تخلخل برای سه فوم ساخته شده به روش A1 و با سه درصد حجمی متفاوت



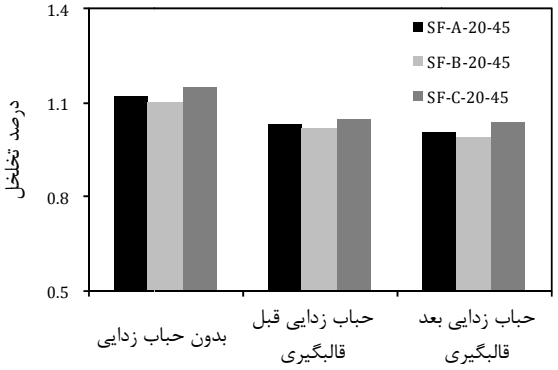
شکل ۷ نمودار میزان تخلخل برای چهار فوم ساخته شده به روش A1 و با ۲۰٪ درصد حجمی میکروبالن و قالب‌گیری در زمان‌های متفاوت پس از همزدن

www.SID.ir

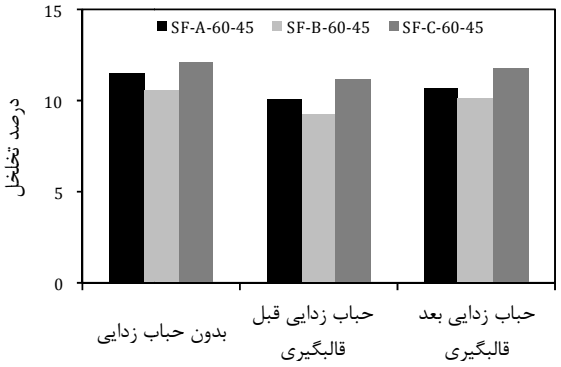
Archive of SID



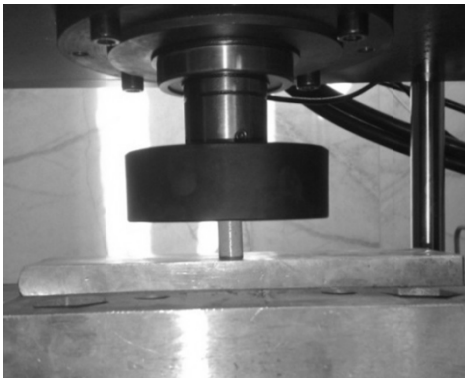
شکل ۸ نمودار میزان تخلخل برای چهار فوم ساخته شده به روش A1 و با ۶۰٪ درصد حجمی میکروبالن و قالب‌گیری در زمان‌های متفاوت پس از هم‌زدن



شکل ۹ میزان تخلخل در ۹ فوم تولیدی به ۹ روش مختلف با ۲۰ ٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه هم‌زدن نهایی



شکل ۱۰ میزان تخلخل در ۹ فوم تولیدی به ۹ روش مختلف با ۶۰ ٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه هم‌زدن نهایی



شکل ۱۱ تصویر نمونه تحت آزمایش فشار

نتایج حاصل از نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که استفاده از آون خلأ قبل از قالب‌گیری به شکل مؤثری از میزان تخلخل ناخواسته می‌کاهد. البته در این مورد نیز هرچه درصد حجمی میکروبالن بیشتر باشد، تأثیر آون خلأ نیز بیشتر خواهد بود. قابل ذکر است اگر از آون خلأ پس از قالب‌گیری استفاده شود، تا حدودی از میزان تخلخل خواهد کاست ولی سطح نهایی نمونه به سبب ایجاد حباب در سطح بسیار ناهموار و نامناسب خواهد بود. بنابراین نتیجه مناسب این است که تا حد امکان از آون خلأ قبل از قالب‌گیری استفاده شود.

۴-۳- میزان مقاومت فشاری

هدف نهایی این مقاله این است که از بین روش‌های ذکر شده که عمومی‌ترین روش‌ها در تولید فوم ترکیبی هستند، روشی تعیین شود تا فوم تولیدی آن بیشترین استحکام را در بین سایر فوم‌ها داشته باشد. ازاین‌رو فوم‌های تولید شده طبق استاندارد ASTM D695 تحت آزمایش فشار قرار گرفته تا استحکام آنها مورد آزمون قرار گیرد. شکل ۱۱ نحوه آزمون مواد در دستگاه آزمایش یونیورسال را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ نمونه‌ای از نمودار تنش - کرنش برای سه فوم با سه درصد حجمی ۲۰٪ و ۴۰٪ و ۶۰٪ است. باقی نمودارها نیز از نظر روند شبیه این سه نمودار هستند. بدین شکل که همه آنها در ابتدا به شکل الاستیک خطی تغییر شکل داده تا به نقطه حداکثر تنش برسند. این تنش همان استحکام فوم در مقابل فشار در نظر گرفته می‌شود. پس از این ناحیه و با افت شدید تنش، ناحیه دوم به نام ناحیه پلاتو[1] شروع می‌شود. در این ناحیه تنش ثابت بوده و عمده جذب انرژی تنش دراین ناحیه انجام می‌گیرد. تحقیقات نشان داده است در این ناحیه علاوه بر رشد ترک در ماتریس، خرد شدن میکروبالن‌ها نیز به شکل فزاینده وجود دارد [۱]. این ناحیه همان مشخصه‌ای است که فوم‌ها را از مواد فاقد تخلخل جدا می‌کند. با توجه به این که مدول قسمت الاستیک برای انواع مختلف فوم‌های ساخته شده تفاوت چندانی نمی‌کند، به مقاومت (تنش حداکثر) فوم و تأثیری که پارامترهای ساخت بر آن می‌گذارند، پرداخته شده است.

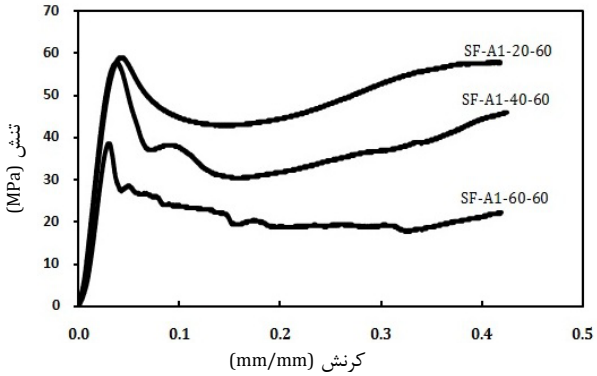
همان‌طور که در دو بخش قبلی ذکر شد دو عیب مهم در فوم‌های ساخته شده، شناوری میکروبالن و تخلخل، پدیده‌هایی اجتناب ناپذیرند و باعث کاهش استحکام فوم خواهند شد [۱]. نتایج تحقیقات نشان داده است که با افزایش درصد حجمی میکروبالن، استحکام فوم کاهش می‌یابد [۱،۳،۷،۱۷]. این نتیجه در نمودارهای شکل ۱۲ نیز دیده می‌شود. بنابراین هرچه شناوری بیشتر باشد در یک سمت درصد حجمی میکروبالن بالا رفته و استحکام آن ناحیه نیز به شدت افت می‌کند. از اینرو در حین بارگذاری ترک‌ها در ناحیه ضعیف فوم زودتر از حد انتظار و در مقادیر پایین تنش ایجاد شده و رشد می‌کند و مقاومت فشاری فوم پایین خواهد آمد. از آنجا که شناوری در فوم‌های با درصد حجمی پایین بیشتر نمایان است، نتایج نشان می‌دهند که هر چه شناوری بیشتر باشد، استحکام فوم کمتر خواهد بود. نمودار شکل ۱۳ مؤید این امر است.

نمودار شکل‌های ۱۴ و ۱۵ استحکام فشاری فوم‌های ۴۰٪ و ۶۰٪ را برای ۴ نوع فوم که در هنگام قالب‌گیری ویسکوزیته متفاوتی داشته‌اند یا به عبارتی به میزان زمان‌های متفاوتی قبل از قالب‌گیری همزده شده‌اند، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد حجمی فوم، تأثیر ویسکوزیته ترکیب قبل از قالب‌گیری بر روی استحکام فوم کاهش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان به کاهش نسبت شناوری در فوم‌های با درصد حجمی بالا دانست.

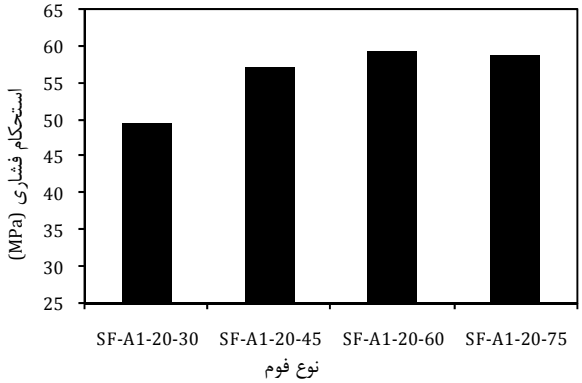
1- Plateau Region

www.SID.ir

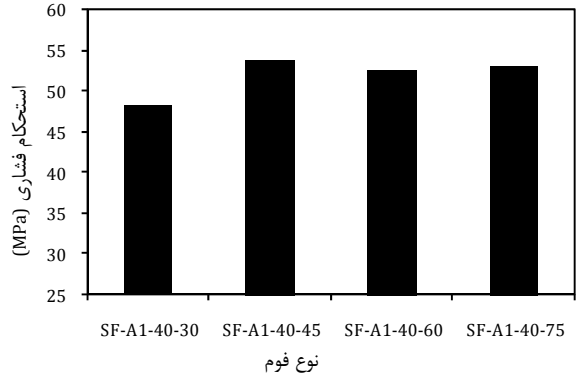
Archive of SID



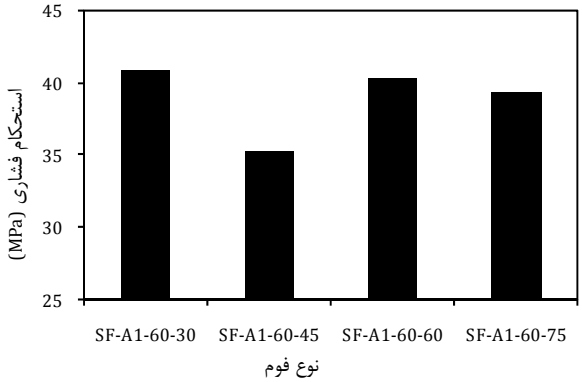
شکل ۱۲ نمودار تنش-کرنش برای سه فوم با درصد حجمی متفاوت میکروبالن



شکل ۱۳ استحکام فشاری در ۴ نوع فوم ۲۰٪ با مدت زمان هم‌زدن متفاوت

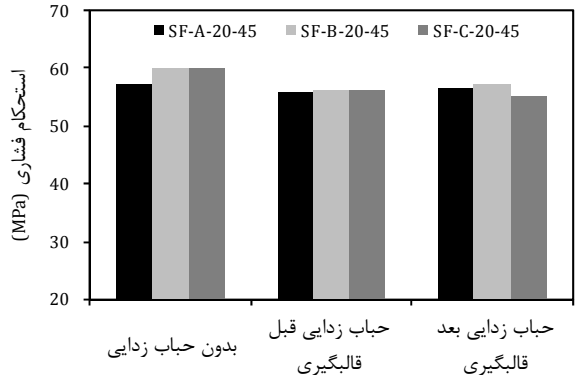


شکل ۱۴ استحکام فشاری در ۴ نوع فوم ۴۰٪ با مدت زمان هم‌زدن متفاوت

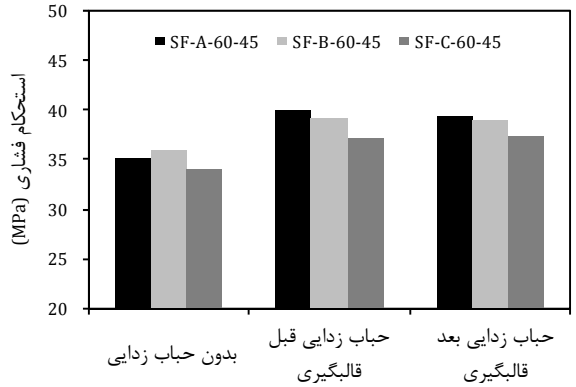


شکل ۱۵ استحکام فشاری در ۴ نوع فوم ۶۰٪ با مدت زمان هم‌زدن متفاوت

نمودار شکل ۱۶ که برای فوم با درصد حجمی ۶۰٪ بدست آمده است، نشان می‌دهد که پارامترهای ترتیب یا سرعت اختلاط تأثیری زیادی در میزان استحکام فشاری فوم ندارد.



شکل ۱۶ میزان استحکام فشاری در ۹ فوم تولیدی به ۹ روش مختلف با ۶۰ ٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه هم‌زدن نهایی



شکل ۱۷ میزان استحکام فشاری در ۹ فوم تولیدی به ۹ روش مختلف با ۲۰ ٪ حجمی میکروبالن و قالب‌گیری پس از ۴۵ دقیقه هم‌زدن نهایی

در مقابل استفاده از آون خلأ قبل از قالب‌گیری باعث ۱۴٪ افزایش تقریبی در استحکام فشاری ماده خواهد شد. حباب‌زدایی به شکل مستقیم با تخلخل موجود در فوم‌ها ارتباط دارد. هرچه میزان تخلخل بیشتر باشد، فضا برای ایجاد و رشد ترک در داخل فوم به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین نتیجه بدست آمده با نتیجه‌ای که از نمودار شکل ۱۰ بدست آمد، هم‌خوانی مناسبی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که در فوم‌های با درصد حجمی بالا مسأله کاهش تخلخل برای افزایش مقاومت فوم حیاتی است.

نمودار شکل ۱۷ استحکام فشاری نمونه‌های فوم ترکیبی با ۲۰٪ حجمی میکروبالن را نشان می‌دهد. تمامی نمونه‌ها پس از زمان ۴۵ دقیقه هم‌زدن قالب‌گیری شده اند. در ۹ روش ذکر شده، تفاوتی بین سه روش اصلی دیده نمی‌شود. مانند فوم‌های با درصد حجمی بالا، ترتیب اختلاط یا سرعت هم‌زدن، تأثیر زیادی بر استحکام فشاری ماده نخواهد گذاشت. ولی حباب‌زدایی با آون خلأ تا حدی (درحدود ۳٪) از استحکام آن کاسته است. علت را می‌توان در شناور شدن میکروبالن‌ها روی سطح عنوان کرد. تجمع میکروبالن‌ها در یک طرف باعث ایجاد ناهمگونی و تمرکز تنش در پایین‌ترین سطح مخلوط میکروبالن و بالاترین سطح رزین خالص است. بنابراین شناور شدن میکروبالن‌ها مهم‌ترین عیب این فوم‌های با درصد پایین است که بایستی رفع شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از ۱۲ روش متفاوت ۳۶ نوع فوم ترکیبی متشکل از میکروبالن‌های سرامیکی و ماتریس اپوکسی ساخته شده و مورد آزمایش فشار قرار گرفته‌اند. با استفاده از نتایج تحقیق که شامل مقاومت فشاری فوم،

www.SID.ir

Archive of SID

شناوری میکروبالن و میزان تخلخل ناخواسته می‌باشد، تأثیر پارامترهای ساخت مانند ترتیب و سرعت اختلاط، ویسکوزیته ترکیب قبل از قالب‌گیری و همچنین حباب‌زدایی نهایی از محصول مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نهایی بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

الف) سرعت هم‌زدن و ترتیب اختلاط اجزاء در استحکام نهایی محصول تغییر چندانی نخواهد گذاشت.

ب) برای تولید فوم ترکیبی با درصد حجمی میکروبالن بالاتر از ۴۰٪، استفاده از آون خلأ پیش از قالب‌گیری سبب کاهش درصد تخلخل فوم شده و استحکام محصول نهایی را افزایش می‌دهد.

ج) برای تولید فوم ترکیبی با درصد حجمی میکروبالن پایین‌تر از ۴۰٪ استفاده از آون خلأ قبل یا بعد از قالب‌گیری باعث افزایش نسبت شناوری میکروبالن‌ها و کاهش مقاومت فوم می‌گردد.

د) برای تولید فوم ترکیبی با درصد حجمی میکروبالن کمتر از ۴۰٪ نزدیک شدن به زمان انتهایی ژل شدن مخلوط میکروبالن و اپوکسی و طولانی شدن زمان هم‌زدن، حالت خمیری شکل مخلوط را تقویت کرده و از میزان شناوری میکروبالن‌ها به شدت می‌کاهد.

۶- مراجع

[1] B. H. Rutz, J. C. Berg, A review of the feasibility of lightening structural polymeric composites with voids without compromising mechanical properties, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 16, No. 1-2, pp. 56-75, 2010.

[2] G. M. Gladysz, K. K. Chawla, Syntactic and composite foams: Proceedings of an Engineering Conferences International (ECI) conference, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 13, pp. 3959-3960, 2006.

[3] N. Gupta, Studies on compressive failure features in syntactic foam material, *Journal of Materials Science*, Vol. 36, No. 18, pp. 4485-4491, 2001.

[4] K. S. Santhosh Kumar, C. P. Reghunadhan, Nair, K. N. Ninan, Mechanical properties of polybenzoxazine syntactic foams, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108, No. 2, pp. 1021-1028, 2008.

[5] N. Gupta, E. Woldesenbet, P. Mensah, Compression properties of syntactic foams: effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 1, pp. 103-111, 2004.

[6] G. Tagliavia, M. Porfiri, N. Gupta, Vinyl Ester-Glass Hollow Particle Composites: Dynamic Mechanical Properties at High Inclusion Volume Fraction, *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 5, pp. 561-582, 2009.

[7] M. Porfiri, N. Gupta, Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, No. 2, pp. 166-173, 2009.

[8] G. Tagliavia, M. Porfiri, N. Gupta, Analysis of flexural properties of hollow-particle filled composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 86-93, 2010.

[9] E. M. Wouterson, Fracture and impact toughness of syntactic foam, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 40, No. 2, pp. 145-154, 2004.

[10] R. Caeti, N. Gupta, M. Porfiri, Processing and compressive response of functionally graded composites, *Materials Letters*, Vol. 63, No. 22, pp. 1964-1967, 2009.

[11] E. Bardy, J. Mollendorf, D. Pendergast, Thermal resistance and compressive strain of underwater aerogel-syntactic foam hybrid insulation at atmospheric and elevated hydrostatic pressure, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 39, No. 9, pp. 1908-1918, 2006.

[12] M. Koopman, Microstructural failure modes in three-phase glass syntactic foams, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 13, pp. 4009-4014, 2006.

[13] E. Plueddemann, *Silane Coupling Agents,* Plenum Press; 1982.

[14] K. C. Yung, Preparation and properties of hollow glass microsphere-filled epoxy-matrix composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 2, pp. 260-264, 2009.

[15] N. Gupta, R. Ye, M. Porfiri, Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 3, pp. 236-245, 2010.

[16] M. M. Islam, H. S. Kim, Novel syntactic foams made of ceramic hollow micro-spheres and starch: Theory, structure and properties, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 15, pp. 6123-6132, 2007.

[17] C. Swetha, R. Kumar, Quasi-static uni-axial compression behaviour of hollow glass microspheres/epoxy based syntactic foams, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 8-9, pp. 4152-4163, 2011.

www.SID.ir