

اثر فرایندهای پخت همزمان و جداگانه بر خواص ساختارهای ساندویچی فنولی

The Effect of Co-cure and Counter Cure Methods on the Properties of Phenolic Sandwich Structures

محمدحسین بهشتی^{۱*}، محمدعلی کدخدایان^۲، مهدی وفائیان^۱

۱ - تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت و چسب

صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

۲ - بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۷۳۴

دریافت: ۸۳/۷/۲۹، پذیرش: ۸۴/۷/۲۷

چکیده

ساختار ساندویچی شامل پوسته‌های نازک، سنگین و مستحکم ولی هسته‌ای سبک و تا حدی ضخیم و نسبتاً ضعیف است که بین آنها اتصالاتی سخت و محکم برقرار است. این ساختارها کاربرد زیادی در صنایع هوا فضا، ساختمان و خودروسازی دارند زیرا از استحکام و سفتی ویژه زیاد و خواص عایق گرمایی و صوتی خوبی برخوردارند. از آنجا که رزینهای فنولی ارزان و از نظر گرمایی پایدارند، به عنوان زمینه در پوسته و به شکل اسفنج در هسته استفاده می‌شوند. در مورد روش ساخت ساختارهای ساندویچی فنولی اطلاعات اندکی در اختیار است، از این رو در این پژوهش، با استفاده از قالبگیری فشاری مبادرت به ساخت آنها به دو روش فرایند همزمان و جداگانه شده است. در فرایند همزمان، هسته و پوسته‌های کامپوزیتی با هم پخت می‌شوند ولی در فرایند جداگانه ابتدا هسته‌ای با چگالی و ضخامت مشخص تهیه و سپس با پوسته‌ها پخت خواهد شد. از نظر تجربی اثر نوع فرایند روی خواص خمشی ساختارهای ساندویچی در شرایط بهینه بررسی شد.

واژه‌های کلیدی

ساختار ساندویچی، اسفنج فنولی - نیتریل، پوسته، پخت همزمان و جداگانه، خواص خمشی

مقدمه

سفتی خمشی در واحد وزن، خواص عایق گرمایی و صوتی بسیار خوب و نیز استعداد فراوان برای کاهش وزن سازه‌هاست. هر یک از اجزای این ساختارها به تنهایی نسبتاً ضعیف و منعطفند، اما هنگامی که به شکل ساختار ساندویچی درآیند، سازه‌هایی محکم، سفت،

ساختار ساندویچی از سه قسمت اصلی تشکیل شده است: دو پوسته نازک، سخت، با استحکام و سنگین، هسته‌ای ضخیم، سبک و نسبتاً ضعیف در میان دو پوسته و لایه نازکی از چسب که هسته را به پوسته‌ها متصل می‌کند [۱]. مهمترین ویژگیهای این نوع ساختار، استحکام زیاد و

Key Words

sandwich structure, phenolic-nitrile foam, skin, co and counter cure, flexural properties

حداقل می‌رساند [۱۴].

پاسارو و همکارانش [۱۵] به دو روش تک و دو مرحله‌ای ساختارهای سانددویچی با پوسته‌ای متشکل از الیاف شیشه و ماتریس پلی پروپیلن و هسته پلی پروپیلن تهیه کرده‌اند. خواص مکانیکی پوسته در نمونه‌های دو مرحله‌ای بهتر از روش تک مرحله‌ای است و قدرت چسبندگی هسته به پوسته در سازه‌های تک مرحله‌ای بیشتر، ولی استحکام خمشی نمونه‌های دو مرحله‌ای به مراتب بهتر است.

برای ساخت ساختارهای سانددویچی روشهای متعددی از جمله قالبگیری فشاری، روشهای لایه گذاری تر، لایه گذاری پیش آغشته، لایه گذاری به روش پیوسته، پیوند اجزا با چسب، رشته پیچی و بالاخره روشهای قالبگیری مایع شامل قالبگیری انتقال رزین (RTM)، قالبگیری تزریقی واکنش ساختاری (SRIM) و قالبگیری تزریقی در خلأ (VIM) بکار می‌رود.

در پژوهشی دیگر کدخدایان و همکارش [۱۶] اثر افزایش ضخامت هسته اسفنجی از جنس فنولی - نیتریل بر رفتار خمشی ساختارهای سانددویچی تهیه شده به روش همزمان و مقایسه نتایج تجربی با معادلات نظری را بررسی کردند. در این پژوهش ساختارهای سانددویچی متشکل از پوسته‌های کامپوزیتی فنولی - آزیست و هسته اسفنجی از جنس فنولی چقرمه با دو روش پخت همزمان و جداگانه و به کمک قالبگیری فشاری تهیه و با اندازه گیری خواص ابعادی و مکانیکی نمونه‌ها مزایا و معایب هر روش معلوم شد.

تجربی

مواد

در ساخت هسته از رزین فنولی چقرمه با قابلیت اسفنج شدن، تهیه شده در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. ویژگیها و چگونگی ساخت آن در مقالاتی دیگر منتشر شده است [۱۷-۱۹]. از پارچه بافته شده الیاف آزیست نوع کریزوتایل با چگالی $2/2 \text{ g/cm}^3$ و وزن واحد سطح 1100 g/cm^2 و با آرایش (90° و 0°) تهیه شده از بازار داخلی و رزین فنولی نوع رزول مایع با گرانیوی $2-3 \text{ Pa.s}$ در 20°C با نام تجاری IL-800 محصول شرکت رزیتان، برای تهیه پوسته‌ها استفاده شد. پخت این رزین بدون استفاده از کاتالیزور اسیدی و در دماهای بالا انجام شد. لازم به یادآوری است که در پخت دمای محیطی این رزینها معمولاً از کاتالیزور اسیدی استفاده می‌شود. همچنین، در تهیه پیش آغشته‌ها از حلال استن برای رقیق سازی استفاده شد.

سخت و سبک به وجود خواهند آورد. هدف اصلی از ساخت این نوع آرایش، افزایش استحکام و سفتی صفحه‌ای نازک با حداقل افزایش در وزن آن است. این ساختارها بیشتر در مواردی بکار می‌روند که نیروی اصلی وارد بر سازه از نوع خمشی است [۲،۳].

هسته را می‌توان به شکلهای مختلف مثلاً انواع اسفنجها و شبکه‌های لانه زنبوری و از ترکیبات گوناگون تهیه کرد [۴-۷]. در انتخاب نوع هسته معیارهای متفاوتی دخالت دارند که از آن جمله می‌توان به شناخت کامل اهداف طراحی مانند وزن مطلوب برای سازه، مشخصات فرایند تولید و جنبه‌های اقتصادی اشاره کرد [۸].

پوسته ساختار سانددویچی را می‌توان از هر ماده سفت، محکم و نازکی تهیه کرد. اما کامپوزیتهای پلیمری از بقیه متداولترند. لایه چسب که وظیفه آن محکم نگهداشتن و تثبیت پوسته‌ها روی هسته است، در انواع مختلفی چون چسبهای فنولی، اپوکسی، یورتان، پلی ایمید، فنولی - نیتریل و غیره موجود است اما گاهی هم از لایه چسب استفاده نشده، عمل اتصال در طول مرحله پخت مواد پوسته و هسته انجام می‌گیرد [۷،۹].

طی پژوهشی برویر و همکارانش [۱۰] صفحات گرمانرم تقویت شده با پارچه، متشکل از ۱۰ لایه پارچه شیشه‌ای که به روش پیوسته با ماتریس پلی آمید ۱۲ آغشته می‌شد تهیه کردند. با گرم کردن سطح پوسته‌ها و هسته ضخیم 13 mm تا کمی بالاتر از دمای ذوب پلی پروپیلن، عمل اتصال به وسیله صفحه‌ای فلزی با شکل مناسب انجام شد. این پژوهشگران روشهای مختلف گرمادهی را موضوع اصلی پژوهش خود قرار دادند و نتیجه گرفتند که رسانش بهترین روش گرم کردن است.

مطالعه روی ساختارهای سانددویچی با هسته لانه زنبوری گرمانرم برای مدل کردن شرایط گرمادهی و چگونگی انتقال گرما و نیز روش تشکیل بلور در لایه سطحی هسته‌های به شکل توده و اثر آنها بر خواص کششی و خمشی سانددویچ انجام شده است [۱۱،۱۲].

امروزه ساختارهای سانددویچی به عناوین مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کوپلیمرهای پلی (اتیلن ترفتالات) و پلی (اتیلن گلیکول) که به کمک گلیسرین، سوربیتول یا فتالیک انیدرید دارای پیوند عرضی در تهیه ساختارهای سانددویچی هوشمند [۱۳] استفاده شده است. ساختارهای سانددویچی سبک با ویژگی مقاومت بسیار زیاد در برابر آتش تهیه شده‌اند. با محکم کردن پوسته به روش مکانیکی در دو انتهای ساختار، از جدا شدن کامل آن از هسته هنگام آتش سوزی ساختمانها جلوگیری می‌شود. در این نوع ساختارها افزایش بیش از حد دما تنها موجب انحنا برداشتن پوسته می‌شود و عمل تخریب کامل ساختار را به دنبال ندارد. این کار خطرات جانی را هنگام آتش سوزی ساختمانها به

دستگاهها

در این پژوهش، دما نگاشت‌های رزین و آمیزه فنولی به کمک دستگاه DSC مدل PL بدست آمد. ضخامت نمونه‌ها، به کمک کولیس رقمی با دقت 0.01 mm اندازه گرفته شد. برای قالبگیری قطعات از پرس ۲۵ ton آزمایشگاهی Daverton با حداکثر دمای 300°C و نیز قالبی فلزی استفاده شد که متشکل از دو صفحه صاف و یک قاب بود که مواد درون آن قرار می‌گرفت.

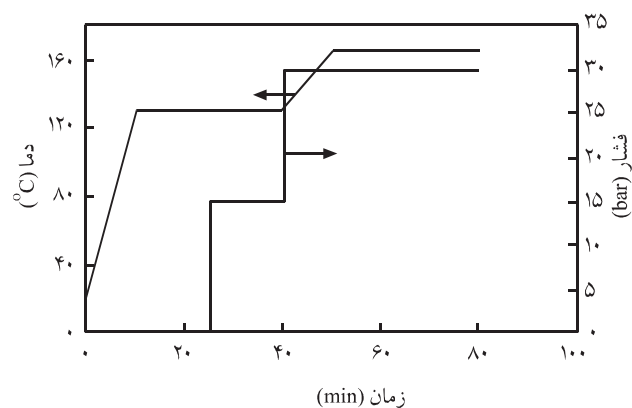
نمونه‌های آزمایش خمش مطابق استاندارد ASTM C965 تهیه و ساختارهای ساندویچی به کمک ااره‌ای با لبه‌های الماسه بریده شدند و به کمک دستگاه Instron مدل ۶۰۲۵ با حداکثر نیروی 100 kN و به روش سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند.

روشها

با آغشته‌سازی پارچه آزیست به رزین رزول رقیق شده با حلال و پیش پخت آن در دمای 130°C به مدت 15 min پیش آغشته‌های پوسته تهیه شد. نمونه‌های پوسته، هسته و ساختارهای ساندویچی به روش قالبگیری فشاری مطابق با چرخه پخت نشان داده شده در شکل ۱ پخت شدند. برای اطمینان از کامل شدن واکنشهای پخت، نمونه‌ها بعد از قالبگیری به مدت 60 min و در دمای 160°C در گرمخانه که در آن هوا در جریان بود قرار داده شدند.

روش پخت همزمان

در این روش پوسته‌های کامپوزیتی و هسته اسفنجی تشکیل دهنده ساختار ساندویچی همزمان و در کنار یکدیگر پخت می‌شوند. ابتدا پیش آغشته‌ای داخل قالب قرار داده می‌شود و روی آن به ترتیب ماده خام اسفنجی و پیش آغشته بعدی قرار می‌گیرد. مجموعه دو پیش آغشته و اسفنج میان آن دو همزمان پخت می‌شوند. با توجه به ضخامت پیش



شکل ۱ چرخه پخت نمونه‌های پوسته، هسته و ساختار ساندویچی.

آغشته‌ها که در حدود $2/2 \text{ mm}$ است و با فرض اینکه ضخامت هر پوسته تقریباً 2 mm باید باشد، ضخامت هسته اسفنجی در حدود 2 mm برآورد شد. در عمل مشاهده شد که این برآورد به واقعیت نزدیک است. به این ترتیب مقدار ماده خام اسفنجی پس از توزین، به شکل لایه‌ای بریده شد و روی پیش آغشته زیرین قرار گرفت تا با قرار گرفتن پیش آغشته روی آنها ضخامت کل از ضخامت قاب بیشتر شود. سپس ورقه‌های جداکننده و صفحه فلزی قرار داده شد و مجموعه زیر پرس قرار گرفت. برای پخت از چرخه پخت پوسته کامپوزیتی استفاده شد، اما به علت ضخیم تر بودن قطعه ساندویچی و به منظور انتقال گرما در حد مناسب، زمانهای پخت اول و دوم (10 min و 30 min) به 20 و 50 min افزایش یافتند. پس از پایان چرخه پخت، نمونه‌ها در داخل گرمخانه که در آن هوا در جریان بود به مدت 2 h در دمای 165°C قرار گرفتند تا از پخت کامل آنها اطمینان حاصل شود. پس از ساخت قطعات، نمونه‌های آزمون مطابق استاندارد تهیه و آزمون خمش سه نقطه‌ای روی آنها انجام شد.

روش پخت جداگانه

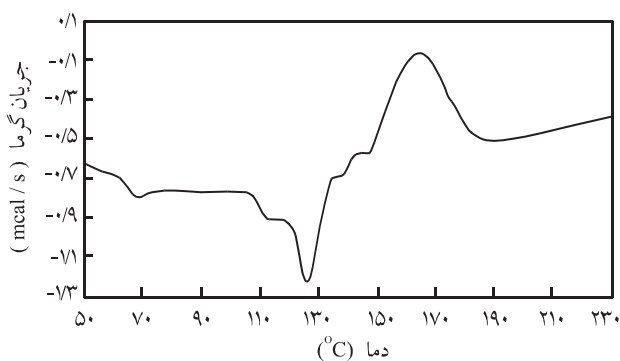
در این روش هسته اسفنجی با چگالی و ضخامت معین جداگانه تهیه و سپس بین دو پیش آغشته قرار می‌گیرد. در مرحله پخت تنها پیش آغشته‌ها پخت می‌شوند و به این ترتیب اتصال بین هسته و پوسته به وجود می‌آید.

ابتدا سه هسته اسفنجی با چگالی 0.6 g/cm^3 و ابعاد $135 \times 115 \times 2 \text{ mm}^3$ تهیه شد. سپس هر هسته اسفنجی بین دو پیش آغشته قرار گرفت و مطابق چرخه پخت پیشنهادی پخت شد و در پایان، پخت بعدی قطعات به مدت 2 h و در دمای 165°C در گرمخانه انجام گرفت. سپس نمونه‌هایی از آنها تهیه و آزمون خمش سه نقطه‌ای روی آنها انجام شد. برای تهیه پوسته‌های کامپوزیتی با 50 ± 2 درصد وزنی الیاف به تجربه ثابت شد که باید پیش آغشته‌هایی با $60-55$ درصد وزنی رزین تهیه شود. با اعمال فشار قالب و تکمیل واکنش پخت، پوسته‌های کامپوزیتی با درصد الیاف دلخواه بدست آمد که البته برای حصول اطمینان کامل، چند نمونه را در کوره در دمای 650°C سوزانده، درصد وزنی الیاف آنها معین شد که با مقدار قابل انتظار در توافق بود. بنابراین، تمام ساختارهای ساندویچی مورد استفاده در این پژوهش از پوسته‌های کامپوزیتی رزول - آزیست با 50 ± 2 درصد وزنی الیاف تهیه شدند. چگالی نظری پوسته کامپوزیتی برابر 755 g/cm^3 بدست آمد که با توجه به وجود حبابهای جزئی غیر قابل اجتناب در پوسته، میزان واقعی باید از این مقدار کمتر باشد. با انجام آزمونهای تعیین چگالی و کسر وزنی الیاف، میزان چگالی تجربی پوسته کامپوزیتی 75 g/cm^3 معین شد.

(شکل‌های ۲ و ۳) علت چسبندگی قوی میان هسته و پوسته برای نمونه‌های تهیه شده به روش همزمان بهتر درک خواهد شد. محدوده دمایی $140-180^{\circ}\text{C}$ در نمودارهای DSC رزین رزول مربوط به واکنش تراکمی گروه‌های هیدروکسی متیل با موقعیت‌های واکنش نداده حلقه فنول و یا واکنش خود تراکمی گروه‌های هیدروکسی متیل است که پخت رزین و ایجاد پیوندهای عرضی را به همراه دارد. پخت هسته و پوسته در محدوده دمایی $135-160^{\circ}\text{C}$ شروع و تمام می‌شود. همدمای بودن پخت در بخش‌های هسته و پوسته سبب خواهد شد بین این دو بخش پیوندهای کووالانسی قوی به وجود آید به طوری که می‌توان ساختار سانددویچی را سازه‌ای یک پارچه تلقی کرد. به همین دلیل است که قبل از جدایی پوسته از هسته شکست در توده هسته اتفاق می‌افتد. در مقابل، چسبندگی بین لایه‌ای قطعات سانددویچی ساخته شده به روش جداگانه ضعیفتر است، البته با اعمال لایه‌ای از رزین رزول به دو طرف هسته اسفنجی قبل از قرار دادن آن بین دو پیش آغشته، افزایش در چسبندگی لایه‌ها چشمگیر بود. با توجه به قدرت چسبندگی بین لایه‌ها روش پخت همزمان روش مناسبتری تشخیص داده می‌شود.

خواص خمشی

رزین رزول در دما و فشار زیاد پخت می‌شود به همین دلیل آب حاصل از واکنش‌های تراکمی به شکل بخار از سامانه واکنش خارج می‌شود، بنابراین، افزایش فشار، خروج بخارات آب را تسریع خواهد کرد که در نتیجه آن پخت کاملتر، چگالی پیوندهای عرضی بیشتر و حفره و فضاهای خالی کمتر خواهد شد. بدین ترتیب خواص مکانیکی (خمشی) کامپوزیت بهبود می‌یابد. همان‌طور که در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود استحکام و مدول خمشی ساختارهای ساخته شده به روش پخت جداگانه بیشتر از روش همزمان است. دلیل آن می‌تواند پخت یکنواخت‌تر پوسته‌ها در روش اول باشد. در روش پخت جداگانه



شکل ۲ دمانگاشت DSC رزین فنولی رزول با سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی پوسته و هسته (اعداد داخل پرانتز انحراف معیار مقادیر را نشان می‌دهند).

خواص	اجزا	پوسته (کامپوزیت آزبست - فنولی)	هسته (اسفنج فنولی چقرمه)
چگالی (g/cm^3)		۱/۵	۰/۶
استحکام کششی (MPa)		۳۶/۸ (۲/۳)	۳/۷ (۰/۱)
مدول کششی (MPa)		۳۹۹۷ (۱۵۵)	۱۱۲ (۷)
حداکثر کرنش کششی (%)		۷۰۴ (۰/۰۹)	۷۸/۲۸ (۷۲۷)
مدول برشی (MPa)		-	۱۵۲/۶ (۷/۸)
استحکام خمشی (MPa)		۸۶/۶ (۴/۸)	-
مدول خمشی (MPa)		۸۳۲۴ (۷۹۸)	-
حداکثر مقدار انحنای (mm)		۱۷۱۲ (۰/۲۹۶)	-

نتایج و بحث

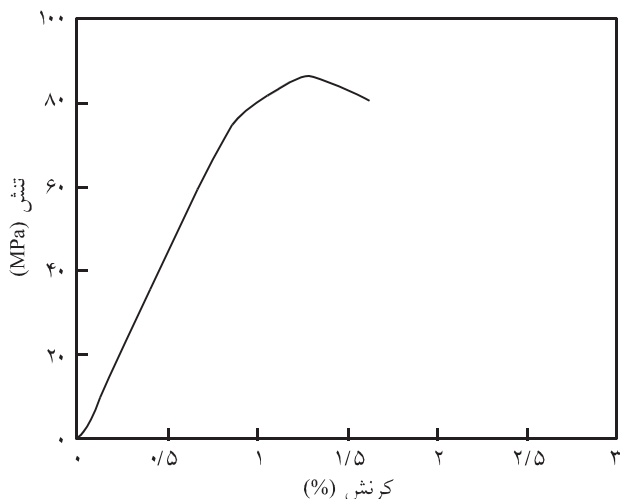
در بررسی خواص ساختارهای سانددویچی و اثر نوع فرایند ساخت روی آنها شناخت خواص هر یک از اجزا امری ضروریست. بنابراین، نمونه‌هایی از کامپوزیت فنولی - آزبست دارای ۵۰ درصد وزنی الیاف آزبست (پوسته) و فنولی چقرمه اسفنجی (هسته) تهیه و خواص فیزیکی و مکانیکی آنها اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد استحکام و مدول کششی اسفنج به مراتب کمتر از استحکام و مدول کششی کامپوزیت آزبست - فنولی است ولی، انعطاف پذیری آن بیشتر (۷۸ برابر) و وزن آن ۶۰ درصد سبکتر است.

چسبندگی بین لایه‌ها

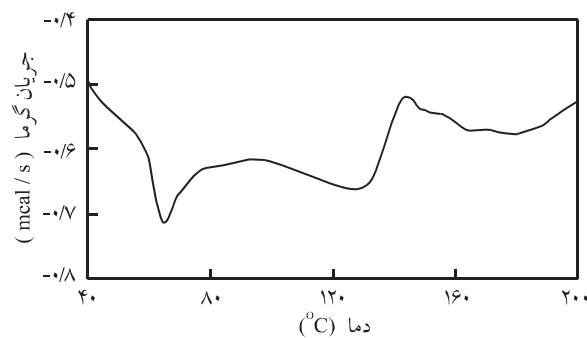
چسبندگی بین لایه‌ای قطعات ساخته شده به شکل کیفی (چشمی) مورد بررسی قرار گرفتند. چسبندگی نمونه‌های ساخته شده به روش پخت همزمان نسبت به روش جداگانه بیشتر بود، به طوری که در قطعات سانددویچی ساخته شده به روش اول مرز بین لایه‌ها دقیقاً مشخص نبود و تداخل فاز هسته در لایه‌ای الیاف پوسته به چشم می‌خورد. حتی در بعضی از نمونه‌ها ماده هسته در اثر ذوب و فشار، از لایه‌ای الیاف بیرون آمده و به سطح پوسته‌ها رسیده بود که نتیجه آن برقراری اتصال قوی میان هسته و پوسته‌ها بود. برای جداکردن پوسته‌ها از هسته در نمونه‌های تهیه شده به روش همزمان نیروی زیادی لازم بود به طوری که در بعضی مواقع به جای جدا شدن پوسته از هسته، قطعه سانددویچی می‌شکست اما هسته از پوسته جدا نمی‌شد.

با توجه به نمودارهای DSC رزین رزول و آمیزه اسفنج فنولی چقرمه



شکل ۴ نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمون خمش پوسته کامپوزیتی رزول - آزیست با ۵۰ درصد وزنی الیاف.

شکل ۵ نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های ساندویچی با ضخامت ۶ mm تهیه شده به روشهای همزمان و جداگانه نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که روش تهیه نمونه اثر زیادی روی رفتار خمشی



شکل ۳ دمانگاشت DSC آمیزه اسفنج فنولی چقرمه با سرعت گرمادهی ۱۰°C/min

هسته صلب تر و فشار اعمال شده به آغشته‌ها بیشتر است و این خود به خروج ماده فرار به وجود آمده در واکنش و کاهش میزان حباب (حفره) در پوسته کامپوزیتی کمک می‌کند. در شکل ۴ نمودار تنش - کرنش آزمون خمش برای یکی از نمونه‌های پوسته کامپوزیتی رزول - آزیست با ۵۰ درصد وزنی الیاف نشان داده شده است. مطابق این نمودار، پوسته به مانند جسمی سخت عمل کرده، رفتار آن کشسان خطی است. در

جدول ۲ خواص خمشی ساختارهای ساندویچی پخت شده به روش همزمان.

شماره نمونه	ضخامت تقریبی هسته (mm)	مدول خمشی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	حداکثر مقدار خمش (mm)
۱	۷۸۵	۲۲۵۱	۴۳/۹۷	۷/۵۹۰
۲	۷۸۳	۱۶۵۴	۲۹/۷۳	۰/۹۸۱۷
۳	۷۸۵	۲۰۹۶	۳۷/۶۰	۰/۹۶۹۴
۴	۷۹۰	۱۸۰۹	۳۷/۸۵	۷/۴۶۷۰
۵	۷۹۰	۱۹۴۸	۳۸/۲۰	۷/۳۷۷۰
میانگین	۷۸۷	۱۹۵۲	۳۷/۴۷	۷/۱۷۰۸
انحراف معیار	۰/۰۳	۲۳۴	۵/۰۷	۰/۲۳۴۰

جدول ۳ خواص خمشی ساختارهای ساندویچی پخت شده به روش جداگانه.

شماره نمونه	ضخامت تقریبی هسته (mm)	مدول خمشی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	حداکثر مقدار خمش (mm)
۱	۲/۱۰	۲۴۵۲	۳۷/۳۳	۰/۷۵۰۲
۲	۲/۱۰	۲۱۲۳	۴۶/۹۹	۷/۳۴۵۰
۳	۲/۱۰	۲۰۴۳	۳۹/۵۳	۷/۰۱۰۰
۴	۲/۱۰	۲۰۶۹	۳۴/۵۵	۰/۹۴۷۱
میانگین	۲/۱۰	۲۱۷۲	۳۹/۶	۷/۰۱۳۱
انحراف معیار	-	۱۹۰	۵/۳۳	۰/۳۴۷۴

انرژی جذبی را داشت که با کامپوزیت‌های رزول - آزبست به دست می‌آید، با این تفاوت که ساختارهای اخیر سنگین‌ترند.

بدین ترتیب با توجه به خواص خمشی نمونه‌ها که از مهمترین ویژگی‌های مکانیکی ساختارهای ساندویچی محسوب می‌شوند، روش پخت جداگانه به روش همزمان ترجیح داده می‌شود. هرچند که مقایسه خواص خمشی مبنای اصلی برای تعیین روش بهتر است اما عوامل دیگری چون مقدار چسبندگی بین لایه‌ها، تهیه هسته اسفنجی با چگالی دلخواه، یکنواخت بودن ضخامت لایه‌ها در سرتاسر قطعه به ویژه در هسته اسفنجی و صاف بودن سطح پوسته‌ها نیز در انتخاب روش تولید مناسب برای ساختارهای ساندویچی تعیین‌کننده‌اند.

دستیابی به چگالی مورد نظر

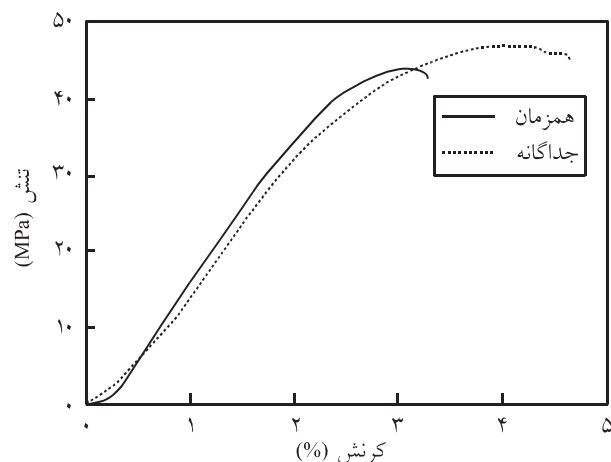
از آنجا که خواص مکانیکی اسفنج به شدت وابسته به چگالی آن است و با تغییرات اندکی در چگالی، خواص مکانیکی به طور قابل توجهی تغییر می‌کند، بنابراین، تهیه ساختارهای ساندویچی با چگالی مورد نظر و تکرارپذیری آنها بسیار حائز اهمیت است. در روش پخت جداگانه کنترل و دستیابی به چگالی مورد نظر، دقیقتر و قابل اعتمادتر است، زیرا در این روش هسته اسفنجی به طور مجزا و در یک مرحله جداگانه تهیه می‌شود و ماده خام کمتر از بین می‌رود. اما در روش پخت همزمان مشکلاتی مثل خروج ماده خام مذاب از اطراف قطعه، نفوذ مذاب به داخل بافت یاف و حرکت تا سطح یاف، عدم کنترل دقیق چگالی را در پی دارند. نتیجه آن که برای امکان دسترسی به چگالی دلخواه که در این پژوهش چگالی 0.6 g/cm^3 مد نظر بوده است روش پخت جداگانه به روش همزمان برتری دارد.

یکنواخت بودن ضخامت لایه‌ها و صافی سطح پوسته‌ها

در روش همزمان به دلیل وجود بستر نرم و منعطف هسته، فشار وارد بر سطح پوسته‌ها یکنواخت نیست و سبب می‌شود پوسته در نتیجه هسته در نقاط مختلف قطعه ضخامت‌های متفاوتی داشته باشند. اما در روش دیگر ضخامت هسته اسفنجی ثابت است و بستر صلبی را برای پیش‌آغشته‌ها فراهم می‌کند که در نتیجه آن فشار و ضخامت لایه‌ها در سرتاسر سطح پوسته‌ها یکنواخت خواهد بود (جدولهای ۲ و ۳). از سوی دیگر ثابت ماندن فشار موجب می‌شود سطح بیرونی پوسته‌ها صاف‌تر شوند بنابراین، روش پخت جداگانه از روش دیگر بهتر است.

نتیجه‌گیری

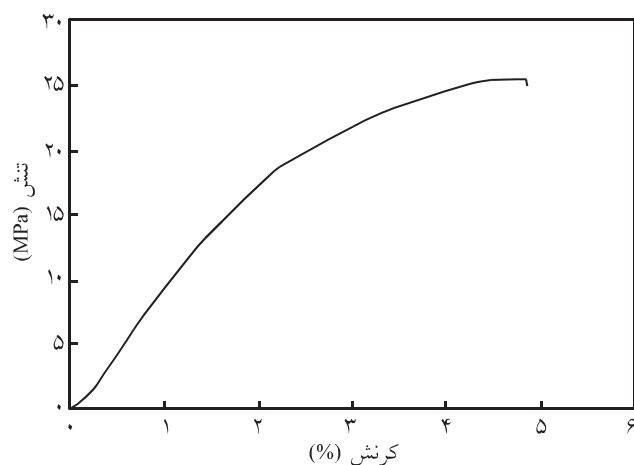
از مقایسه خواص فیزیکی و مکانیکی ساختارهای ساندویچی با هسته و



شکل ۵ نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمون خمش ساختار ساندویچی ساخته شده به روش همزمان و جداگانه با ضخامت 6 mm.

بر جای گذاشته است. در نمونه‌های تهیه شده به روش جداگانه مقدار تنش شکست بیشتر است. با زیاد شدن ضخامت سازه، مقدار استحکام خمشی کاهش می‌یابد. این موضوع را از مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان متوجه شد. با زیاد شدن ضخامت هسته رفتار کشسان خطی که در نمونه پوسته و ساختارهای با ضخامت 6 mm به وضوح دیده می‌شود به سوی رفتار ویسکوالاستیک خطی پیش می‌رود که ویژگی ماده سازنده هسته است.

با بررسی سطح زیر نمودار شکل‌های ۴ و ۵ معلوم شد که میزان انرژی جذب واحد حجم پوسته و نمونه‌های ساندویچی تقریباً حدود 1300 MPa است. در صورتی که وزن واحد حجم نمونه‌ها مدنظر قرار گیرد مسلم است که با ساختارهای ساندویچی سبک می‌توان همان



شکل ۶ نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمون خمش ساختار ساندویچی ساخته شده به روش همزمان با ضخامت 10 mm.

هسته اتفاق افتاد. در مقابل، چسبندگی بین لایه‌ای قطعات ساندویچی ساخته شده به روش جداگانه در مقایسه با روش همزمان ضعیفتر بود، البته با اعمال لایه‌ای از رزین رزول به سطح اسفنج سازه‌های خوبی تهیه شد. مدول و استحکام خمشی سازه‌های تهیه شده به روش جداگانه بیشتر از روش دیگر بود. این مورد همراه با یکنواخت بودن ضخامت لایه‌ها و صاف بودن سطح پوسته‌ها سبب می‌شود که در تهیه ساختارهای ساندویچی با هسته اسفنجی روش جداگانه مورد نظر باشد.

مراجع

1. Marshall A.C., Core Composite and Sandwich Structures, In: *International Encyclopedia of Composites*, 6, LEE S.M., (Ed.), VCH, New York, 445-465, 1990.
2. Johnson A.F. and Sims G.D., Mechanical Properties and Design of Sandwich Materials, *Composites*, 17, 321-328, 1986.
3. Rosato D.V., *Designing with Reinforced Composites: Technology, Performance, Economics*, Hanser, Munich, 240-245, 1997.
4. Richardson T., *Composites, a Design Guide*, Industrial Press, New York, 123-125, 1987.
5. SP System *Composites Materials Handbook*, SP System, Isle of Wight, UK, 248-261, 1999.
6. Marshall A.C., Core Composite and Sandwich Structures, In: *International Encyclopedia of Composites*, 1, LEE S.M., (Ed.), VCH, New York, 488-506, 1990.
7. Benning C.J., *Plastic Foams*, 2, John Wiley, New York, 81-207, 1969.
8. Dohn G. and O'Meara R., How to Select a Core Material, *Reinforced Plast.*, 43, 22-27, 1999.
9. Skeist I., *Handbook of Adhesives*, 3rd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 316-321, 1977.
10. Breuer U., Ostgate M. and Neitzel M., Manufacturing of all Thermoplastic Sandwich Systems by a One-step Forming Technique, *Polym. Compos.*, 19, 257-279, 1998.
11. Akremo M. and Astrom B.T., Modling Compression Molding of all Thermoplastic Honeycomb Core Sandwich Components-Part A: Model Development., *Polym. Compos.*, 21, 245-256, 2000.
12. Kawamoto N., Mori H., Yui N., Nitta K.H. and Terano M., Tensile and Flexural Behavior of Polypropylene Sheets with Different Crystallinities of Surface Layer, *Angew. Makromol. Chem.*, 35, 201-210, 1997.
13. Chun B.C., Cha S.H., Park C., Chung Y.C., Park M.J. and Cho J.W., Dynamic Mechanical Properties of Sandwich Structured Epoxy Beam Composites Containing Poly (ethylene terephthalate)/Poly (ethylene glycol) Copolymer with Shape Memory Effect, *J. Appl. Polym. Sci.*, 90, 3141-3149, 2003.
14. Cooke G.M.E., Stability of Lightweight Structural Sandwich Panels Exposed to Fire, *Fire Mater.*, 28, 299-308, 2004.
15. Passaro A., Corvaglia P., Manni O. and Barone L., Processing-Properties Relationship of Sandwich Panels with Polypropylene Core and Polypropylene Matrix Composite Skins, *Polym. Compos.*, 25, 307-318, 2004.
16. Kadghodayan M.A. and Beheshty M.H., The Design of Phenolic Resin Sandwich Structures, *Inter. J. Eng. (in Persian)*, 13, 57-67, 2002.
17. Beheshty M.H., Afzali S.K. and Naderi Gh., The Compounding of Phenolic Nitrile Blends: I-Effect of Phenolic Resin, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (in Persian)*, 14, 309-315, 2001.
18. Beheshty M.H., Naderi Gh. and Delbari H., Cure Cycle Optimization of a Phenolic-Nitrile Foam, *Tahghigh, (in Persian)*, 12, 27-33, 2001.
19. Beheshty M.H., Afzali S.K. and Naderi Gh., The Compounding of Phenolic Nitrile Blends: I-Effect of Nitrile Elastomer Type, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (in Persian)*, 14, 317-322, 2001.