بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت سطح قطعات تولید شده به روش پولتروژن

Archive of SID

Investigation of Factors Affecting the Surface Quality of Pultruded Profiles

مسعود اسفنده*، امیر مسعود رضادوست، سید علیرضا ثابت، سید محمد باقر علوی

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت و چسب، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۸۰/۸/۶، پذیرش: ۸۱/۵/۷

چکیده

در فرایندهای شکل دهی کامپوزیتها، کیفیت سطح قطعه دارای اهمیت زیادی است. فرایند پولتروژن یکی از روشهای عمده تولید پیوسته قطعات کامپوزیتی با سطح مقطع ثابت است. در این پژوهش عوامل مؤثر بر کیفیت سطح یک نمونه قطعه تولید شده به روش پولتروژن بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برای قطعه با سطح مقطع گرد و از جنس الیاف شیشه و رزین پلی استر، افزایش فشردگی مواد درون قالب، استفاده از عوامل رهاساز سازگار با سیستم رزین و نیز نوع و درصد عامل پخت نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت سطح قطعه تولید شده دارد. همچنین، سرعت کشش و نیم‌رخ دمایی قالب باید متناسب با فرمولبندی مورد استفاده تنظیم شوند.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، پولتروژن، پلی‌استر سیر نشده، کیفیت سطح، خط سردسازی

Key Words: composite, pultrusion, unsaturated polyester, surface quality, cooling line

مقدمه

پولتروژن یکی از فرایندهای اقتصادی تولید انواع قطعات کامپوزیتی با سطح مقطع ثابت (پروفیل) است که طی چند سال گذشته اهمیت زیادی پیدا کرده است[۱]. بازده بالا تولید، قیمت تمام شده پایین، کیفیت بالای محصول و عدم نیاز به عملیات تکمیلی این فرایند را متداول ساخته است. این فرایند در سراسر جهان بطور عملی بکار گرفته می‌شود و رقابت شدیدی در عرصه تولید محصولات متفاوت و با فرمولبندیهای گوناگون وجود دارد. در شکل ۱ طرحی کلی از فرایند پولتروژن نشان داده شده است.

ابتدا الیاف تقویت کننده یا هرگونه شکل پیوسته‌ای از الیاف، مانند رشته یا پارچه، از درون قفسه‌های مخصوص با عبور از یک سیستم راهنما وارد یک حمام رزین شده تا آغشته شوند. در مرحله بعد الیاف دوباره در کنار هم جمع شده و به محل پیش شکل‌دهی وارد می‌شوند که الگویی از قالب اصلی را به الیاف آغشته شده می‌دهد. پس از آن الیاف آغشته به رزین وارد قالب می‌شوند.

گرما و فشار درون قالب موجب پخت رزین می‌شود و قطعه نهایی شکل می‌گیرد. این قطعه به وسیله دستگاه کشش از قالب

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: M.Esfandeh@ipi.ac.ir

www.SID.ir

بیرون کشیده می‌شود. پس‌ازآن محصول به کمک یک سیستم برش، که ممکن است متحرک باشد، در اندازه‌های دلخواه بریده می‌شود.

سرعت تولید خط پولتروژن با توجه به ساختار و شکل قطعه و نوع سیستم گرمادهی تا چند متر بر دقیقه می‌تواند تنظیم شود. این سرعت برایند سرعت خیس شدن الیاف و سرعت پخت درون قالب است، یعنی اگر یکی از مراحل مثلا آغشته‌سازی به کندی انجام گیرد، سرعت کلی فرایند کاهش می‌یابد، بنابراین باید طراحی قسمتها به نحوی انجام شودکه در حداکثر سرعت خود بتوانند عمل کنند.

طول ماشینهای پولتروژن تا ۱۸ متر هم می‌رسد و اگرچه دستگاه به صورت یک خط پیوسته است، ولی ممکن است بین دو قسمت آن فاصله طولانی وجود داشته باشد.

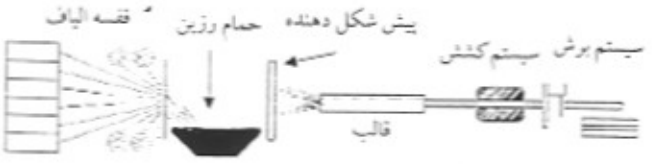
خواص فیزیکی- مکانیکی قطعه تولیدی به روش پولتروژن برای بسیاری از کاربردها که از مواد کامپوزیت در آنها استفاده می‌شود (از جمله کاربرد یاد شده) کافی یا بالاتر از حد نیاز است [۲]، اما کیفیت سطح قطعه نقش تعیین کننده‌ای دارد. کیفیت ضعیف سطح قطعه، علاوه بر ایجاد حساسیت ناشی از تماس، مشکلاتی از قبیل چسبندگی به لاستیک و آسیب پذیری در برابر عوامل شیمیایی ایجاد می‌کند. بنابراین، شناخت عوامل تأثیرگذار بر کیفیت ظاهری قطعه اعم از مواد اولیه و شرایط فراورش دارای اهمیت خاصی است. در واقع، انتخاب صحیح این دو عامل می‌تواند محصولی با کیفیت سطح عالی وخواص مورد نظر فراهم سازد. در این پژوهش، تأثیر عوامل فرایندی مانند سرعت کشش و دمای قالب و همچنین اثر نوع مواد اولیه (تهیه شده از بازار داخلی) بر کیفیت سطح محصول تولیدی بررسی می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش برای تولید انبوه قطعات مورد نیاز در خط سرد سازی ترد یکی از کارخانه‌های تایرسازی بکار گرفته شده است.

تجربی

مواد

مواد مصرف شده در این پژوهش عبارتند از:

رزین پلی‌استر سیرنشده از نوع ایزوفتالیک ۷۵۱۱۲۹ از شرکت صنایع شیمیایی بوشهر، بنزوئیل پروکسید (BPO) از شرکت مرک و t- بوتیل پربنزوئات (Trigonox C) از شرکت AkzoNoble، الیاف شیشه رشته‌ای از نوع E باچگالی طی g/km(tex) ۲۴۰۰ از شرکت Nittobo ژاپن، دو نوع موم پلی اتیلن با دمای ذوب ۷۰ و ۱۰۷ °C و روی استئارات تهیه شده از منابع داخلی و همچنین مخلوط



شکل ۱- نمایی از فرایند پولتروژن

Archive of SID

آمینهای چرب و استر فسفاتهای آلی با نام تجاری Moldwiz از شرکت AxelPlast.

دستگاهها

برای بررسی شرایط پخت رزین دستگاه DSC ساخت Polymer Laboratory مدل STA۶۲۵ و برای ساخت نمونه‌ها از دستگاه پولتروژن ساخته شده در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد.

روشها

دستگاه پولتروژن مورد استفاده از قسمتهای زیر تشکیل شده است: قفسه الیاف، حمام آغشته سازی رزین به طول ۱۵cm ، قالب دو کفه‌ای به طول ۱m که دارای یک شیار مدور آب‌کرم داده شده به قطر۱۲mm بوده و مجهز به سیستم کنترل گرمایی است، سیستم کشش تسمه‌ای و بخش برش.

در قفسه الیاف، الیاف به صورت حلقه‌های بدون دوک (centerless) به تعداد کافی قرار داده می‌شوند. برای هدایت الیاف به داخل حمام رزین، حلقه‌های سرامیکی با قطر ۱۴mm در مسیر عبور آنها تعبیه شده است.

حمام رزین مجهز به غلتکهایی است که عبور الیاف را از درون رزین تضمین می‌کنند. طول حمام باید به اندازه‌ای باشد که در سرعت کشش مورد نظر فرصت آغشته‌سازی الیاف وجود داشته باشد. الیاف پس از خروج از حمام از بین دو غلتک عبور داده می‌شوند تا ضمن گرفتن رزین اضافی، از نفوذ رزین در بین الیاف اطمینان حاصل شود. شیب دهانه قالب الیاف را بتدریج در امتداد قالب جمع می‌کند و هوای محبوس در رزین و الیاف را خارج می‌سازد. در این مرحله، غالبا مقداری رزین از دهانه قالب برمی‌گردد که نشان دهنده کافی بودن رزین حمل شده به وسیله الیاف است. عملیات پخت رزین درون قالب انجام می‌گیرد و گرمای لازم به وسیله المنتهای الکتریکی فشنگی، که در طول قالب نصب شده‌اند، تأمین می‌شود. قالب دارای سه ناحیه گرمایی است که با توجه به فرمولبندی رزین تنظیم می‌شوند. قطعه پخت شده بطور پیوسته به وسیله دستگاه کشش از قالب بیرون کشیده می‌شود. قدرت گیره

www.SID.ir

جدول ۱- فرمولبندی پایه مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها.

ماده	درصد وزنی
رزین پلی استر ایزوفتالیک	۲۶/۵
الیاف شیشه E رشته‌ای	۷۰
بنزوئیل پروکسید	۰/۲۵
کلسیم کربنات	۲/۲۵
تیتان دیوکسید	۰/۵
رهاساز داخلی	۰/۵

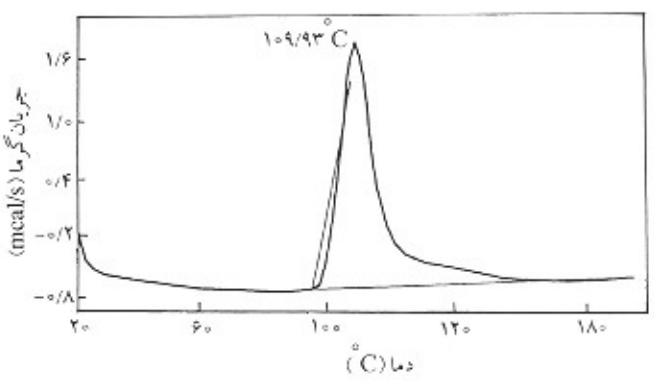
(clamping force) دستگاه کشش مورد استفاده در این پژوهش سه تن و قدرت کشش(pulling force) آن پنج تن است. در انتهای خط پولتروژن، سیستم برش قرار دارد که وظیفه برش قطعه را به طولهای مورد نظر بر عهده دارد. به منظور کارایی بهتر، لازم است تیغه برش الماسه باشد.

ساخت نمونه

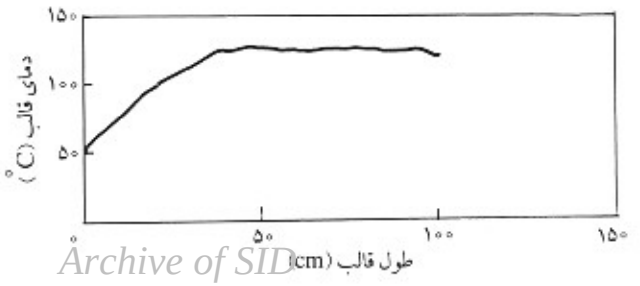
در جدول ۱ فرمولبندی پایه برای تهیه قطعه میله‌ای با مقطع گرد و قطر ۱۲mm آورده شده است.

برای تهیه مخلوط رزین با استفاده از یک مخلوط‌کن پیوسته بنزوئیل پروکسید در رزین حل می‌شود. پس از آن عامل رهاساز و در آخر کلسیم کربنات و تیتان دیوکسید به مخلوط اضافه می‌شود. همزدن تا حصول مخلوط یکنواخت ادامه می‌یابد. سپس، این مخلوط به حمام رزین که قبلا الیاف شیشه به تعداد مورد نظر از آن عبور داده شده است منتقل می‌شود.

برای تعیین شرایط پخت و تنظیم دمای نواحی گرمایی قالب، از فرمولبندی رزین دارای ۱ درصد بنزوئیل پروکسید، آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی به عمل آمد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار DSC رزین پلی‌استر دارای ۱درصد بنزوئیل پروکسید.



Archive of SID

شکل ۳- نیم رخ دمایی قالب.

با توجه به دمای آغاز، ماکسیمم و پایان پیک گرماده، دمای نواحی گرمایی قالب از دهانه ورودی به ترتیب ۸۰ ، ۱۲۵ و ۱۲۵°C معین شد. نیم رخ دمایی قالب در شکل ۳ نشان داده شده است.

سرعت کشش به گونه‌ای تنظیم شد که قطعه پس از خروج از قالب به اندازه‌ای سخت شده باشد که به هنگام عبور از گیره کشش تغییر شکل ندهد. بر این مبنا سرعت کشش ۲۵ cm/min تنظیم گردید.

نتایج و بحث

اثر مقدار الیاف در قالب

برای بررسی اثر مقدار الیاف بر کیفیت سطح قطعه، درصد وزنی الیاف در فرمولبندی تغییر داده شد. جدول ۲ فرمولبندیهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

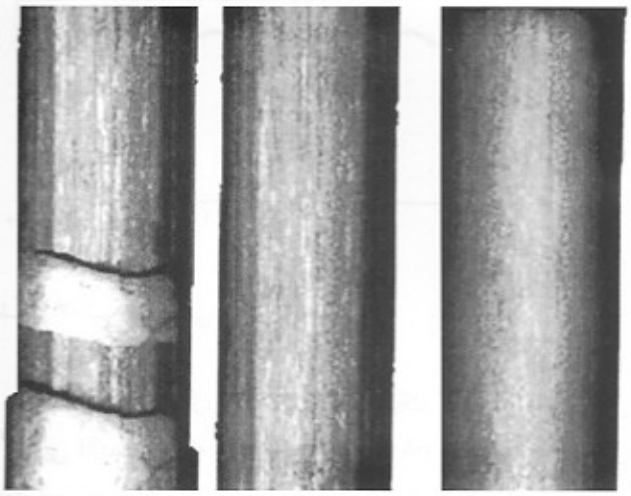
سطح قطعه ساخته شده از فرمولبندی ۱ کاملا ناصاف و خشن بوده و الگوی الیاف کاملا قابل مشاهده است. همچنین، قطر قطعه

جدول ۲- فرمولبندیهای بکار گرفته شده برای بررسی اثر مقدار الیاف در قالب.

فرمولبندی / مواد (phr)	۱	۲
رزین	۱۰۰	۱۰۰
الیاف شیشه*	۱۶۴	۲۶۴
کلسیم کربنات	۵	۵
تیتان دیوکسید	۲	۲
آغازگر	۱	۱
رهاساز	۲	۲

*۱۶۴ و ۲۶۴ phr به ترتیب معادل ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی است.

www.SID.ir

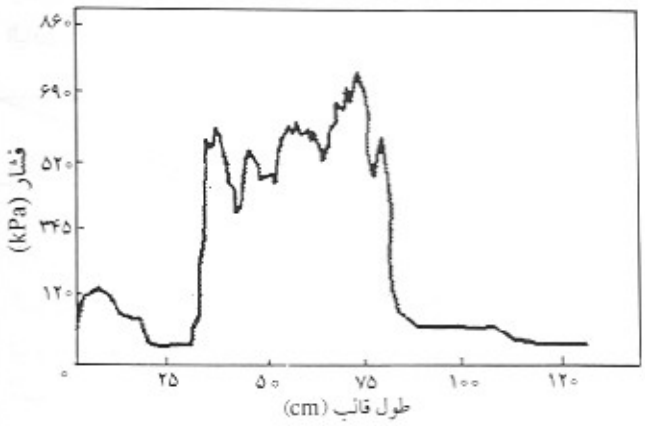


شکل ٤- اثر مقدار الیاف بر کیفیت سطح و قطر میله پولترود شده.

اندکی کمتر از قطر موردنظر است. برای رفع این نقایص فرمولبندی ۲ که در آن مقدار الیاف ۱۰ درصد وزنی بیشتر بود تهیه شد، سطح قطعه حاصل به دلیل افزایش فشردگی مواد درون قالب، کیفیت مطلوبی داشت (شکل ٤).

باید در نظر داشت که از جمله عوامل مؤثر بر کیفیت سطح قطعه، فشار درون قالب است. با توجه به اینکه قطعه به هنگام عبور از طول قالب دارای سه فاز مایع، ژل و جامد است [٤،۳]، فشار درون قالب در این سه ناحیه متفاوت است. شکل ٥ نمایی از نیم رخ فشار درون یک قالب را نشان می‌دهد[٥].

در ناحیه اول که رزین به صورت مایع است، فشار مشاهده شده مربوط به جریان برگشتی رزین در دهانه شیبدار قالب و مقاومت الیاف در برابر موازی شدن (collimation) است. بعد از عبور الیاف آغشته شده به رزین از دهانه شیبدار قالب، فشار دوباره کاهش



شکل ٥- نمایی از نیم رخ فشار درون یک قالب [٥].

می‌یابد. سپس، رزین با قرار گرفتن در ناحیه گرمادهی شروع به انبساط گرمایی می‌کند و ضمنا بتدریج پخت می‌شود. در این ناحیه که رزین به صورت ژل است فشار افزایش می‌یابد. نوسانات فشار مشاهده شده در ناحیه ژل ناشی از رقابت انبساط گرمایی رزین با جمع شدگی حجمی ناشی از پخت آن است[٥].

بعد از پخت رزین و شکل گیری قطعه، جمع شدگی حجمی از انبساط گرمایی بیشتر شده، قطعه از قالب جدا می‌شود و فشار دوباره افت می‌کند. همان طور که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، بیشترین فشار مربوط به ناحیه ژل است و کیفیت سطح قطعه نیز در این ناحیه معین می‌گردد[٥،٦].

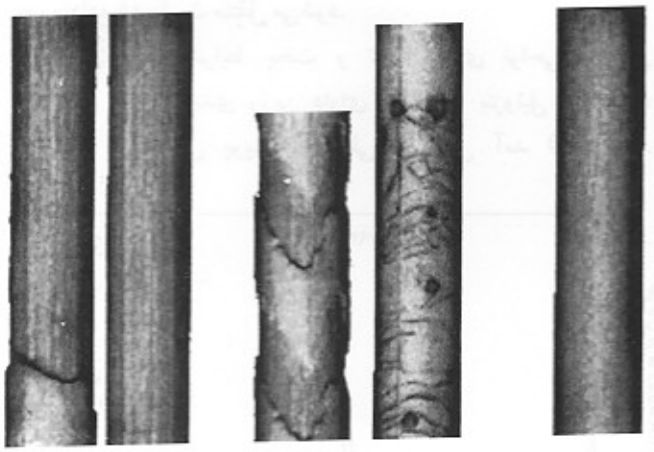
با توجه به مطالب بالا، ناصاف بودن سطح قطعه حاصل از فرمولبندی ۱ را می‌توان ناشی از ناکافی بودن فشار در ناحیه ژل دانست. یکی از راههای حل این مشکل افزایش فشار ناحیه ژل از طریق افزایش درصد الیاف است. کیفیت خوب سطح قطعه حاصل از فرمولبندی ۲ این موضوع را تایید می‌کند.

Archive of SID

اثر عوامل رهاساز

برای بررسی اثر مواد رهاساز از پنج نوع ماده مختلف استفاده شد که در جدول ۳ مشخصات آنها آورده شده است. در تولید محصول با رهاسازهای ارائه شده در این جدول سه پدیده مشاهده می‌شود (شکل ٦):

- قطعه از ابتدای فرایند سطح کاملا ناصافی دارد.
- قطعه در ابتدا سطح مطلوبی دارد، ولی به مرور سطح آن



(الف) (ب) (ج)

شکل ٦- سطوح مشاهده شده ناشی ازبکارگیری رهاسازهای مختلف: (الف) رهاساز MoldWiz ، (ب) رهاساز پلی اتیلنی و (ج) روی استارات.

www.SID.ir

جدول ۳- عوامل رهاساز مورد استفاده در فرایند پولتروژن.

ردیف	نوع عامل رهاساز	شکل فیزیکی	دمای ذوب (°C)	خانواده شیمیایی
۱	موم PE	پولکی	۶۰ – ۹۰	پلی اولفینها
۲	موم PE	پودر	۱۰۷	پلی اولفینها
۳	روی استئارات	پودر	۱۲۰	نمک اسید چرب
٤	MoldWiz	مایع	-	مخلوط آمینهای چرب و استر فسفاتهای آلی

Archive of SID

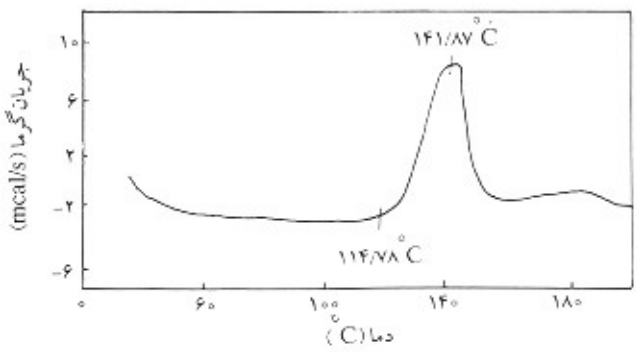
ناصاف و خشن می‌شود.

- قطعه در تمامی طول فرایند سطح مطلوبی دارد.

ازمیان عوامل رهاساز استفاده شده، MoldWiz بهترین نتیجه را نشان می‌دهد.

توضیح آنکه، یک رهاساز مناسب باید بطور یکنواخت در فرمولبندی پخش شود، با آن مخلوط پایدار تشکیل دهد و قبل از شروع پخت به روی سطح قطعه مهاجرت کند. این بدان معناست که عامل رها ساز به هنگام اختلاط باید با رزین سازگار باشد، ولی با افزایش گرما و نزدیک به دمای پخت سازگاری آن کاهش یابد و به سطح قطعه مهاجرت کند [۵]. بدیهی است که در صورت جامد بودن عامل رها ساز، دمای ذوب آن باید پایینتر از دمای شروع پخت رزین باشد. به دلیل آنکه رهاساز MoldWiz از ویژگیهای یاد شده برخوردار است، در طول فرایند، قطعه با سطح مطلوب حاصل می‌گردد (شکل ٦ الف).

مواد رهاساز ردیفهای ۱ و ۲ جدول ۳ سازگاری فیزیکی مناسبی با رزین ندارند و به دلیل تجمع در سطح حمام رزین، بتدریج از فرمولبندی حذف می‌شوند. از این رو، قطعه‌ای که در ابتدای فرایند از قالب بیرون می‌آید به دلیل غنی بودن فرمولبندی رزین از رهاساز، سطح مناسبی دارد، ولی با گذشت زمان به علت مصرف سریع رهاساز و کمبود آن در فرمولبندی، قطعه به قالب می‌چسبد و سطحی



شکل ۷- نمودار DSC رزین پلی‌استر دارای ۲ درصد t- بوتیل پربنزوات.

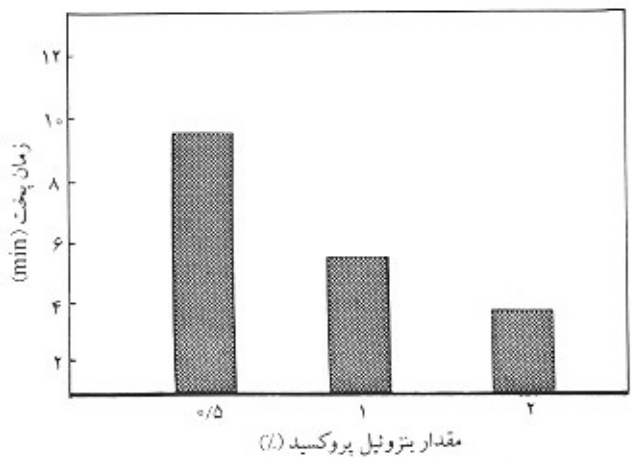
ناصاف پیدا می‌کند (شکل٦ ب). علاوه بر این، رهاساز ردیف ۲ دارای دمای ذوب بالاتر از دمای شروع پخت رزین است و امکان مهاجرت مؤثر رهاساز به سطح قطعه وجود ندارد. در نتیجه، سطح قطعه از همان ابتدا ناصاف و خشن بوده و الگوی الیاف کاملا مشخص است. این مشکل در خصوص رهاساز ردیف ۳ نیز مشهود است (شکل ٦ ج).

اثر عامل پخت

برای مطالعه اثر نوع عامل پخت، از دو سیستم بنزوئیل پروکسید (BPO) و t- بوتیل پربنزوات (Trigonox C) که دماهای فعال شدن متفاوتی دارند، استفاده شد. برای تعیین دمای نواحی گرمایی قالب از آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی استفاده شد که نمودارهای مربوط به ترتیب در شکلهای ۲ و ۷ آورده شده است.

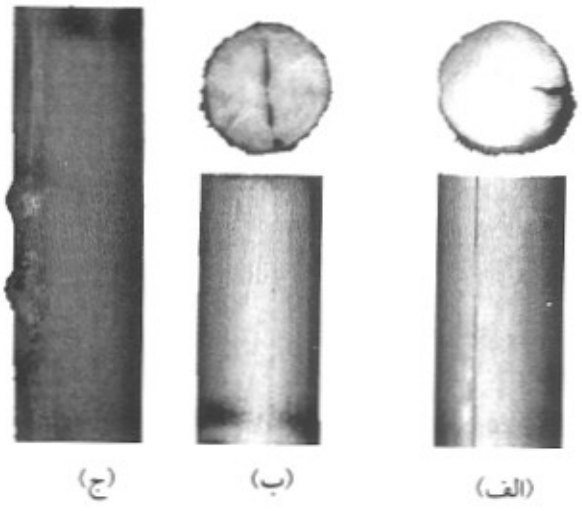
همانند سیستم بنزوئیل پروکسید، که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، برای سیستم t- بوتیل پربنزوات نیز با استفاده از گرما سنجی پویشی (شکل ۷) دمای نواحی مختلف قالب از دهانه ورودی، به ترتیب برابر ۸۰، ۱۲۵ و ۱۳۵°C تنظیم شد.

برای مطالعه اثر مقدار عامل پخت بر زمان پخت رزین، از بنزوئیل پروکسید در مقادیر وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد استفاده شد.



شکل ۸- اثر مقدار بنزوئیل پروکسید بر زمان پخت پلی استر.

www.SID.ir

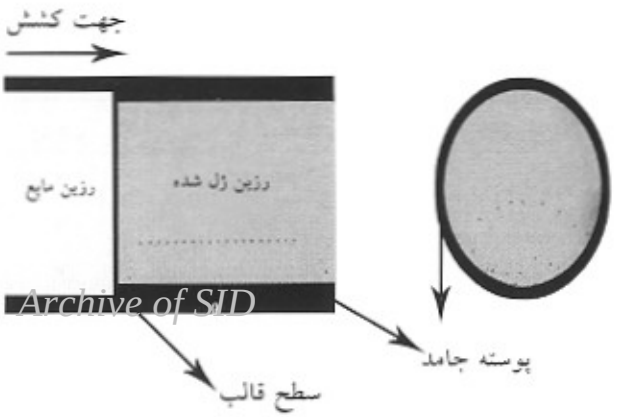


شکل۹- سطوح مشاهده شده حاصل از بکارگیری دو آغازگر: (الف) ۱ درصد BPO با سرعت کشش بالاتر از ۲۵cm/min، (ب) ۲ درصد BPO با سرعت کشش ۲۵ cm/min و (ج) t- بوتیل پربنزوات.

بدین منظور مقدار مشخصی از رزین در لوله شیشه ای (هم قطر با حفره قالب) ریخته شد و لوله درون حمام روغن با دمای ۱۲۵°C قرار گرفت. به منظور بررسی پخت رزین از یک همزن که زبانه آن حرکت نوسانی طولی انجام می‌داد، استفاده شد. مدت زمان پخت (t_c)، فاصله زمانی ورود نمونه به حمام تا توقف حرکت همزن در اثر پخت رزین در نظر گرفته شد. در این حالت سطح رزین نیز کاملا سخت شده بود. در شکل ۸ نمودار زمان پخت بر حسب درصد بنزوئیل پروکسید نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، رزین دارای ۰/۵ درصد پروکسید طی ۹ دقیقه پخت می‌شود. این مدت برای فرایند پولتروژن زمانی طولانی محسوب می‌گردد. از طرفی، استفاده از سرعت کششی که زمان اقامت کافی (۹ دقیقه) را برای پخت قطعه در داخل قالب فراهم نکند، منجر به ترک خوردگی سطح قطعه در اثر انبساط گرمایی ناشی از واکنشهای اولیه پخت می‌شود (شکل ۹ الف).

با افزایش مقدار پروکسید به ۱ درصد، زمان پخت تا ۵ دقیقه کاهش می‌یابد که زمان نسبتا مطلوبی است.

استفاده از ۲ درصد پروکسید باعث می‌شود رزین در مدت ۳ دقیقه پخت شود، ولی مقدار گرمای واکنش به قدری زیاد است که باعث جوشیدن استیرن موجود در رزین و ترک خوردگی در ناحیه مغزه قطعه می‌شود (شکل ۹ ب).



Archive of SID

شکل ۱۰- تشکیل پوسته پخت‌شده درقالب در اثر پخت‌غیریکنواخت سطح و مغزه قطعه.

البته، از آنجا که در این فرایند، به محض جامد شدن قطعه می‌توان آن را از قالب بیرون کشید و امکان ادامه پخت در بیرون قالب نیز وجود دارد، زمان بدست آمده به روش ذکر شده (t_c) بیشتر از زمان لازم برای جامد شدن قطعه در قالب پولتروژن است. بطور تجربی مشاهده شده است که زمان لازم برای جامد شدن قطعه در قالب پولتروژن تقریبا ۳۰ درصد کمتر از t_c است.

در خصوص عامل پخت t- بوتیل پربنزوات، دلیل محدودیت ناشی از دمای جوش استیرن (۱۴۵°C) و با درنظر گرفتن گرمای واکنش، دمای قالب الزاما ۱۳۵°C تنظیم شد. با این شرایط و در حداقل سرعت کشش قابل قبول (۱۵ cm/min) نیز قطعه با کیفیت سطح مطلوب بدست نیامد. در واقع، قطعه تولیدی پس از خروج از قالب هنوز بقدر کافی پخت نشده و استیرن واکنش نداده است، که در این هنگام بر اثر گرمای واکنش و حذف فشار قالب به دمای جوش می‌رسد، با خروج از قطعه موجب ایجاد نقص در آن می‌شود (شکل ۹ ج). در مجموع می‌توان گفت که t- بوتیل پربنزوات به تنهایی عامل پخت مناسبی برای فرایند پولتروژن محسوب نمی‌شود.

یکی دیگر از نکات مهمی که در انتخاب سیستم پخت باید به آن دقت داشت، که البته متغیرهای فراورش مانند سرعت کشش و دمای قالب نیز در آن مؤثرند، مسئله پخت یکنواخت درون قطعه است. در غیر این صورت پدیده پخت پوسته‌ای در آن اتفاق می‌افتد که در بخش زیر به آن اشاره می‌شود.

اثر سرعت کشش و محدوده دمایی قالب

سرعت کشش با توجه به اثری که بر عملکرد عامل پخت و رهاساز دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عبارت دیگر، سرعت کشش با توجه به این عوامل تعیین می‌شود. به عنوان مثال، به هنگام استفاده از یک سیستم پخت مشخص، سرعت خط تا زمانی می‌تواند

www.SID.ir

شکل ۱۱- پدیده پخت پوسته‌ای ناشی از پخت غیریکنواخت قطعه درون قالب.

بیشتر شود که پخت رزین درون قالب انجام شود. در غیر این صورت، قطعه خروجی از قالب دارای سطحی ترک خورده یا دارای قطرات پخت نشده رزین است (شکل ۹ الف و ج). بطور کلی، سرعت خط مناسب در فرایند پولتروژن برای هر فرمولبندی مشخص، بالاترین سرعتی است که در آن قطعه حاصل از فرایند کیفیت سطح مناسبی داشته باشد.

انتخاب صحیح محدوده دمایی قالب نیز دارای اهمیت بسیار است. اگردمای قالب پایینتر از حد لازم باشد، نقایص مربوط به پخت ناکافی رزین ظاهر می‌شوند و اگر بالاتر از مقدار لازم باشد، گرمای واکنش می‌تواند سبب ایجاد ترک در مغزه قطعه شود (شکل ۹ ب). همچنین، تنظیم محدوده‌های دمایی باید به نحوی باشد که مغزه قطعه به هنگام رسیدن به ناحیه شروع پخت به اندازه کافی گرم شده باشد. در غیر این صورت، سطح قطعه که در تماس با قالب است بسرعت پخت می‌شود و پوسته‌ای جامد تشکیل می‌دهد، درحالی که قسمت درونی قطعه هنوز به قدر کافی پخت نشده است (شکل ۱۰) [۷].

کشش قطعه در این حالت باعث می‌شود که قسمت مغزه از پوسته پخت شده جدا شده و قطعه خارج شده از قالب سطحی بسیار ناهموار و قطری بسیار کمتر از قطر قالب داشته باشد. در این حالت، غالبا پوسته درون قالب باقی می‌ماند (شکل ۱۱).

نتیجه گیری

- با افزایش درصد الیاف از ۱٦٤ به ۲٦٤ phr، فشردگی مواد درون قالب زیاد می‌شود و قطعه با کیفیت سطح مطلوب بدست می‌آید.

- عامل رهاساز باید قبل از پخت رزین با آن سازگار بوده و با قرار گرفتن در دمای پخت به سطح قطعه مهاجرت کند. از میان رهاسازهای بکارگرفته شده، رها ساز برپایه مخلوط آمینهای چرب و استر فسفاتهای آلی با نام تجاری MoldWiz بهترین نتیجه را می‌دهد.

- نوع و میزان عامل پخت کیفیت سطح قطعه را متأثر می‌کند. در این مورد، استفاده از بنزوئیل پروکسید به میزان ۱ درصد بهترین نتیجه را می‌دهد.

- سرعت کشش و نیم رخ دمایی قالب باید با توجه به عامل پخت و رهاساز مورد استفاده معین گردد.

Archive of SID

مراجع

1. Zainal Abidin A. "High Speed Pultrusion of Epoxy Composites" PhD Thesis, UMIST, UK, 1996.

۲- نقشه‌های فنی خط سرد سازی ترد مجتمع لاستیک کرمان.

3. Sharma D., McCarty T. A.,Roux J.A., and Vaughan J.G., "Fluid Mechanics Analysis of a Two-dimensional Pultrusion Die Inlet" *Polym. Eng. & Sci.*; **38**, 1611-22, 1998.
4. Hunter G. A.; Pultruding Epoxy Resin; *43*rd Annual Conference, Composites Institute, SPI, 1988.
5. Gutowski T.G.; *Advanced Composites Manufacturing;* John Wiley & Sons, Chapter 7, 1997.
6. Starr T. F.; *Pultrusion for Engineers*; CRC, Chapter 4, 2000.

۷. مسعود اسفنده و همکاران، "گزارش پروژه تولید میله‌های پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه به روش پولتروژن" پژوهشگاه پلیمر ایران، ۱۳۸۰.

www.SID.ir