



## فرآیند بازپخت حرارتی پلی‌کربنات برای حذف تنش‌های پسماند

مهناز ذاکری<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی هوافضا، قطب طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های فضایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

### چکیده

روش فتوالاستیسیته یکی از قدیمی‌ترین روشهای تجربی برای مطالعه میدان تنش است. یکی از عوامل اصلی خطا در آزمایشهای فتوالاستیک، وجود تنشهای پسماند در نمونه آزمایش است که خطوط هم تنش را تحت تاثیر قرار داده و منحرف می‌کند. برای رفع این تنشهای زاید، لازم است که ماده تا دمایی بالاتر از دمای انتقال کریستالی حرارت داده شود. تعداد فرآیندهای بازپختی که تاکنون برای تنش‌زدایی از ورق پلی‌کربنات پیشنهاد شده و به کار رفته‌اند بسیار محدود است. در این مقاله فرآیندهای بازپخت موجود برای زدودن تنش پسماند از صفحات پلی‌کربنات، مطالعه و با انجام آزمایش ارزیابی می‌شوند. سپس با انجام تصحیح در پارامترهای موثر، عملیات حرارتی گوناگون در مراحل مختلفی اجرا می‌شود. با بررسی نتایج این مراحل، در نهایت فرآیند مناسبی ارائه می‌شود که امکان تنش‌زدایی از صفحه پلی‌کربنات را ضمن کاهش زمان و هزینه بازپخت فراهم نماید.

**کلمات کلیدی:** فرآیند حرارتی؛ تنش‌های پسماند؛ پلی‌کربنات؛ آسیب سطحی؛ فتوالاستیسیته.

## Annealing process of polycarbonate for deletion of residual stresses

M. Zakeri<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Aerospace Eng. Dep't, Center of Exc. Design and Simulation of Space Sys., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran

### Abstract

Photoelasticity method is one of the oldest experimental methods for the study of stress field. One of the main causes of error in photoelastic experiments is the existence of residual stresses in the test sample, which affect the observed isochromatic fringes and make them deviate from their position. To remove these excess stresses, it is necessary to heat the material to a temperature higher than the glass transition temperature. There are a limited number of annealing cycles proposed or applied for stress removing from polycarbonate (PC) sheet until now. In this paper, annealing processes for removing residual stresses from PC sheet are studied and evaluated using experiments. Then, by making some modifications in effective parameters, thermal operations are performed in different steps. By appraising the results of these steps, finally, a modified thermal process is presented which can remove the residual stress from the polycarbonate sample among reducing the time and cost of the annealing process.

**Keywords:** Thermal process; Residual stress; Polycarbonate; Surface damage; Photoelasticity.

## ۱- مقدمه

پلی‌کربنات، پلیمر بی‌شکلی است که معمولاً به شکل ورق در بخش‌های مختلف سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده مقاومت ضربه‌ای بالایی دارد، عملیات شکل‌دهی بر روی آن به راحتی امکان‌پذیر است و برای محدوده دمایی گسترده‌ای قابل استفاده است [۱]. همچنین، پلی‌کربنات ماده‌ای فتوالاستیک با خاصیت شکست دوگانه نور<sup>۱</sup> بوده و در مقابل تنش بسیار حساس است. از اینرو در پژوهش‌های زیادی برای انجام آزمایش‌های فتوالاستیسیته و بررسی توزیع تنش به کار رفته است [۲-۴]. با این حال، تنش‌های پسماند به سادگی در صفحات پلی‌کربنات ایجاد می‌شوند. اعمال حرارت و فشار هنگام تهیه و شکل‌دهی ورق پلی‌کربنات و نیز تنش‌های حرارتی و فشاری در فرآیندهای ماشینکاری و ساخت قطعات، منجر به ایجاد تنش‌های پسماندی می‌شود که گاهی اثرات مخربی بر عمر مفید قطعه دارند. حضور این تنش‌ها در آزمایش‌های مربوط به ارزیابی میدان تنش با روش‌های تجربی، سبب ایجاد خطا در نتایج آزمایش خواهد شد. از اینرو شناخت تنش‌های پسماند زاید و رفع آن، نقش مهمی در ارزیابی صحیح میدان تنش ایفا می‌کند.

مطالعات علمی در خصوص تنش‌های پسماند سابقه‌ای بیش از نیم قرن دارد. در سال ۱۹۵۱ هنریکسن<sup>۲</sup> [۵] با انجام آزمایش‌هایی بر روی فرآیند ماشینکاری متعامد نشان داد که عملیات ماشینکاری منجر به ایجاد تنش‌های پسماند با مکانیزم‌های مکانیکی و حرارتی می‌شوند. اوکوشیما و کانیکو<sup>۳</sup> [۶] با ارائه یک مدل اجزای محدود و انجام آزمایش‌هایی نتیجه گرفتند که تنش‌های پسماند کششی و فشاری در فلزات به ترتیب حاصل مکانیزم‌های حرارتی و مکانیکی هستند. گرچه تاکنون پژوهشگران زیادی تنش‌های پسماند ناشی از اثرات برش و فشار و همچنین اعمال تنش‌های حرارتی را بررسی کرده‌اند [۷-۱۱] اما مطالعاتی که در مورد حذف این تنش‌ها از صفحات پلی‌کربنات انجام شده‌اند بسیار محدود بوده و تعداد روش‌هایی که برای این منظور پیشنهاد شده‌اند بسیار اندک است.

در این پژوهش، ابتدا دلایل ایجاد تنش پسماند در ورق پلی‌کربنات بیان شده و سپس روش‌های موجود برای رفع این تنش‌ها از صفحات پلی‌کربنات معرفی می‌شوند. با اجرای هر یک از این روش‌ها، نقاط ضعف و قوت فرآیند مشخص شده و برای تصحیح این روش‌ها به منظور افزایش کارایی و کاهش زمان و هزینه فرآیند، آزمایش‌های بازپخت مختلفی به صورت سعی و خطا بر روی قطعاتی با هندسه و ضخامت‌های گوناگون اجرا می‌شود. با جمع‌بندی نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی، در نهایت فرآیند حرارتی مناسب برای ورق پلی‌کربنات پیشنهاد می‌شود.

## ۲- نحوه ایجاد تنش پسماند

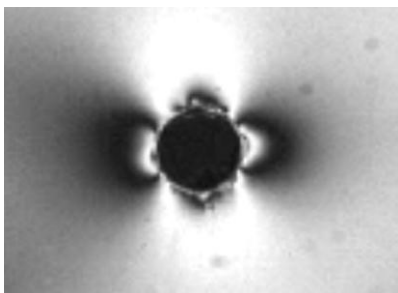
حرارت و فشار اعمال شده در ضمن مراحل تولید صفحات پلی‌کربنات و نیز در فرآیندهای ماشینکاری و ساخت قطعه، مهمترین عوامل ایجاد تنش‌های پسماند در آن هستند. بطور کلی فرآیند تولید صفحات تخت پلی‌کربنات، اکستروژن است. بدین شکل که ابتدا ماده تغذیه<sup>۴</sup> را به صورت قطعات و ذرات آماده شده در محفظه دستگاه قرار می‌دهند. سپس ماده تا دمای معینی پیش‌گرم شده و با اعمال فشار توسط سنبه<sup>۵</sup>، از داخل قالبی به سمت بیرون جریان می‌یابد [۱۲].

سه دلیل عمده برای تغییر دمای قطعه کار (پلی‌کربنات) در فرآیند اکستروژن وجود دارد: پیش‌گرم کردن بیلت، کار پلاستیک در مناطقی که تغییر شکل پلاستیک دارند، اصطکاک بین ذرات جامد اولیه در ناحیه تغذیه، بین ذرات با دیواره سیلندر و همچنین بین ابزار و قطعه کار و مقاومت آن در مقابل حرکت که سبب تغییر دما در سطح قطعه می‌شود. در پایان عملیات اکستروژن، قطعه کار از مجرای قالب خارج شده و به صورت ورق شکل می‌گیرد. سپس ورق‌ها از بین غلطک‌هایی با دمای پایین عبور داده می‌شوند تا خنک شده و شکل آنها تثبیت گردد. تغییرات موضعی دما در طی این فرآیند باعث انقباض غیریکنواخت محصول در مرحله سرد شدن می‌شود که به نوبه خود منجر به ایجاد تنش‌های پسماند خواهد شد.

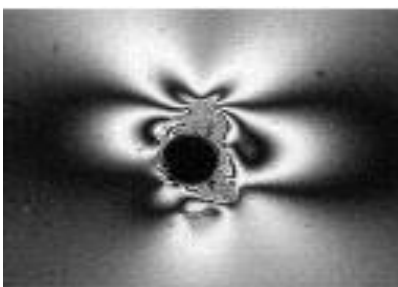
<sup>۱</sup> Double Refraction<sup>۲</sup> Henriksen<sup>۳</sup> Okushima and Kakino<sup>۴</sup> Billet<sup>۵</sup> Ram

ناشی از سوراخکاری<sup>۳</sup> صفحات پلی‌کربنات را نشان می‌دهد. با توجه به حساسیت بالای این صفحات، ایجاد چنین تنشهایی در سطوح ماشینکاری شده به دلیل فشار اعمال شده و حرارت تولید شده در حین انجام ماشینکاری، غیر قابل اجتناب است.

بدیهی است که هنگام آزمایش نمونه‌های فتوالاستیک برای بررسی میدان تنش در پلاریسکوپ، حضور تنشهای پسماند بر شکل حاشیه‌های هم‌تنش تاثیر گذاشته و مسیر آنها را منحرف می‌کند. عدم توجه به این امر می‌تواند سبب ایجاد خطاهای قابل‌توجه در نتایج آزمایش و تخمین غیرصحيح تنش شود. از سوی دیگر، تنشهای پسماند در اطراف عوامل تمرکز تنش می‌تواند پس از ساخت قطعه و در حین کار، اثرات مخربی روی هندسه قطعه بگذارد. همچنین حضور این تنشها خطر افزایش موضعی تنش تا مقادیر بحرانی را به دنبال دارد که از عوامل اصلی تخریب در بسیاری از قطعات مهندسی است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- خطوط هم‌تنش مربوط به تنش پسماند ناشی از سوراخکاری [۴] (الف) سوراخکاری قائم، (ب) سوراخکاری با زاویه انحراف ۴ درجه

در حین انجام عملیات ماشینکاری و ساخت قطعات مورد نظر از صفحات پلی‌کربنات، به دلیل فشار اعمال شده و حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک، تنشهای پسماند در سطوح ماشینکاری شده و به ویژه در اطراف عوامل تمرکز تنش ایجاد می‌شوند. در صورتی که تکان و لرزش و یا کجی و انحراف<sup>۱</sup> بین ابزار و ورق پلی‌کربنات در حین ماشینکاری وجود داشته باشد توزیع و مقدار تنشهای پسماند تغییر خواهد کرد [۴]. همچنین تمام پارامترهای ایجادکننده یا شدت دهنده فرآیندهای فشاری و برشی و نیز پارامترهایی که بر درجه حرارت قطعه کار در حین عملیات ماشینکاری اثر می‌گذارند می‌توانند بر تنشهای پسماند اثر بگذارند [۷]. با توجه به تاثیر همزمان دو پارامتر دما و فشار در ایجاد تنشهای پسماند، معمولاً توزیع این تنشها قابل پیش‌بینی نبوده و بررسی آنها جز از طریق آزمایش‌های تجربی امکان ندارد. در ادامه، روش آزمایشگاهی فتوالاستیسیته به عنوان روشی ساده برای مشاهده و بررسی جریان تنش به اختصار معرفی می‌شود.

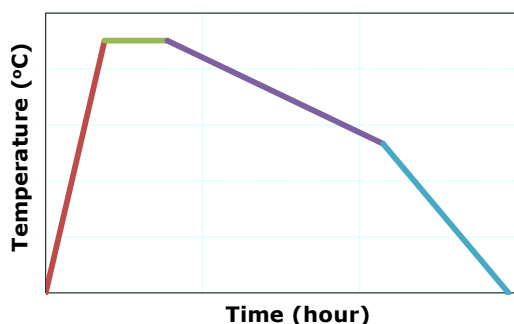
## ۲-۱- روش تجربی فتوالاستیسیته

در روش آزمایشگاهی فتوالاستیسیته، با تاباندن نور پلاریزه به مدلهایی از مواد فتوالاستیک، توزیع تنش در داخل نمونه‌ها قابل مشاهده خواهد بود. برای مشاهده خطوط جریان یا حاشیه‌های هم‌تنش<sup>۲</sup> از ابزاری به نام پلاریسکوپ استفاده می‌شود که در آن، با قرار گرفتن نمونه مورد آزمایش در فاصله بین دو عدسی، نور پلاریزه بر آن تابیده می‌شود. نمونه آزمایش یا مدل فتوالاستیسیته، در میان دو عدسی قرار گرفته و با اعمال بار خارجی بر آن، حاشیه‌های هم‌تنش بصورت حلقه‌هایی در آن مشاهده می‌شود. شکل‌گیری حاشیه‌های هم‌تنش در نمونه مورد آزمایش و افزایش تعداد و اندازه حلقه‌ها با افزایش مقدار بار خارجی، نشان دهنده بالا رفتن میزان تنش در نقطه مورد نظر خواهد بود [۱۳]. در شکل ۱ نمونه‌هایی از حلقه‌های فتوالاستیک هم‌تنش در اطراف یک سوراخ پیچ آمده است که توزیع تنشهای پسماند

<sup>۱</sup> Tilting<sup>۲</sup> Isochromatic Fringes<sup>۳</sup> Drilling

### ۳-۱- ارزیابی روش‌های موجود

منابع موجود در مورد فرآیندهای حرارتی رفع تنش پسماند از صفحات پلی‌کربنات، نشان می‌دهند که تاکنون سه سیکل حرارتی برای این ماده پیشنهاد شده و به کار رفته است. نخستین سیکل بازپخت توسط پاپالتر<sup>۱</sup> و سان‌جیراردی<sup>۲</sup> پیشنهاد شده است [۱۸ و ۱۹]. در این فرآیند، قطعه مورد نظر از دمای محیط تا دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد با نرخ ۲۰-۱۵ درجه در ساعت حرارت داده شده و به مدت ۱۰-۵ ساعت در این دما نگه داشته می‌شود. سپس با نرخ خنک-کاری  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$  سرد می‌شود تا به دمای ۱۰۰ درجه برسد. پس از آن نرخ خنک‌کاری به  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$  افزایش می‌یابد تا اینکه قطعه به دمای اتاق برسد. اگر دمای اتاق ۲۰ درجه باشد، این سیکل بطور متوسط در حدود ۵۹ ساعت به طول می‌انجامد. شکل ۲ نموداری از این فرآیند را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- سیکل بازپخت برای تنش‌زدایی پلی‌کربنات بر اساس مرجع [۱۸]

در سالهای اخیر روش پیشنهادی پاپالتر و سان‌جیراردی [۱۸ و ۱۹] در پژوهشی توسط پیسی<sup>۳</sup> و همکاران [۳] تصحیح شده و به صورت دو مرحله مجزا به کار رفته است. در این روش، مرحله اول از عملیات حرارتی برای خشک کردن پلی‌کربنات و جلوگیری از ایجاد حباب در آن انجام می‌گیرد. بدین ترتیب که دمای قطعات پلی‌کربنات تا دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود که بین نقطه جوش آب و دمای انتقال شیشه پلی‌کربنات قرار دارد. قطعات به مدت دو

برای رفع تنش‌های زاید، لازم است که ماده تا دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای حرارت داده شود تا به حالت خمیری در آید و تنش‌های موجود در آن آزاد شوند. سپس ماده سرد می‌شود تا بار دیگر به حالت جامد درآید. در ادامه، ابتدا نحوه رفع تنش‌های پسماند در مواد پلیمری از دیدگاه علم مواد به اختصار بیان شده و سپس روش‌های موجود برای فرآوری حرارتی پلی‌کربنات بررسی می‌شود.

### ۲-۲- دمای انتقال شیشه‌ای پلیمرها

پلی‌کربنات، نمونه‌ای از پلیمرهای بی‌شکل است. رفتار عمومی پلیمرهای بی‌شکل معمولاً در رابطه با دمای انتقال شیشه‌ای آنها ( $T_g$ ) تعیین می‌شود. در کمتر از این دما، ماده در فاز جامد و صلب بوده و رفتار ترد دارد. اما وقتی دما تا بالای  $T_g$  افزایش یابد مولکولها مقداری آزادی برای حرکت چرخشی حول باندهای شیمیایی دارند. لذا صلبیت به تدریج کاهش یافته و ماده ویژگیهای الاستومری نشان می‌دهد [۱۴].

دمای انتقال شیشه‌ای پارامتر بسیار مهمی است که دمای فرآیندهای حرارتی گوناگون برای یک ماده پلیمری را تعیین می‌کند. اما به دلیل پیچیدگی بسیار در فیزیک آن، علیرغم وجود روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری  $T_g$ ، اختلاف قابل توجهی بین نتایج این اندازه‌گیریها برای یک ماده مشخص دیده می‌شود که ممکن است به بزرگی ۱۵-۱۰ درجه باشد [۱۵]. برای دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌کربنات در مراجع مختلف [۱ و ۱۶-۱۸] مقادیری بین ۱۴۵ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بیان شده است و در این تحقیق، مشابه با اکثر مراجع موجود، مقدار متوسط آن یعنی ۱۴۷ درجه در نظر گرفته می‌شود.

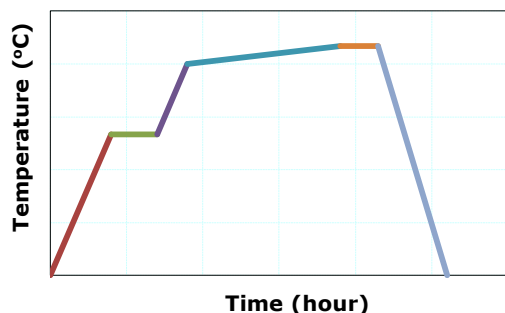
### ۳- روش‌های رفع تنش پسماند از صفحات ماده پلی‌کربنات

مطالعه تنش‌های پسماند ناشی از ماشینکاری پیشینه‌ای بیش از نیم قرن دارد. به منظور رفع این تنش‌ها، قطعه باید تحت عملیات بازپخت حرارتی قرار گیرد. در این بخش ابتدا به معرفی روش‌های موجود برای رفع تنش‌های پسماند از صفحات پلی‌کربنات پرداخته و سپس نتایج این روشها با انجام آزمایش بررسی می‌شود.

<sup>1</sup> Pappalettere

<sup>2</sup> Sangirardi

<sup>3</sup> Pacey



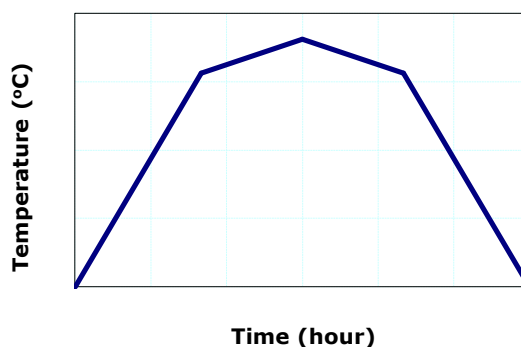
شکل ۴- سیکل حرارتی برای بازپخت پلی کربنات طبق مرجع [۱۷]

۳-۲- بازپخت براساس هر یک از روش‌های موجود برای ارزیابی نتایج هر یک از سه فرآیند بازپخت پیشنهاد شده در مراجع پیشین، آزمایش‌هایی بر روی صفحاتی با ضخامتهای مختلف انجام شد. در هر مرحله از آزمایشها، دو نمونه از صفحات پلی کربنات با نامهای تجاری بارلو پی‌سی<sup>۱</sup> محصول شرکت بارلو پلاستیک به ضخامت ۱۰ mm، PMS-1 محصول شرکت ویشی<sup>۲</sup> به ضخامت ۶ mm و پلی کربنات لکسان<sup>۳</sup> محصول شرکت جنرال الکتریک به ضخامت ۳ mm تهیه شده و جهت تولید تنشهای پسماند، شکافهایی با ضخامت کم در آنها ایجاد شد. برای ایجاد این شکافها از دستگاه اره الکتریکی پروکسون<sup>۴</sup> استفاده شد که ضخامت تیغه آن ۰/۲ میلی‌متر است. همچنین درمورد شکافهای مرکزی، ابتدا حفره‌ای به طول ۲۰ mm و ضخامت ۲ mm توسط دستگاه جت آب<sup>۵</sup> (شکل ۵) ایجاد شد و سپس با عبور دادن تیغه اره از این حفره، طول شکاف افزایش پیدا کرد. شکل ۶ تنشهای پسماند ایجاد شده در اطراف شکاف یک نمونه از این قطعات را نشان می‌دهد.

جهت ارزیابی نتایج حاصل از فرآیند پیشنهاد شده در مرجع [۱۸]، ۶ نمونه پلی کربنات با ضخامتهای مختلف به شرح فوق، در کوره قرار گرفته و طبق سیکل شکل ۲ بازپخت شدند. سپس وضعیت تنشهای موجود در آنها، به کمک دستگاه پلاریسکوپ مورد مشاهده قرار گرفت. بررسی خطوط

روز در این دما نگه داشته شده و سپس خنک کاری می‌شوند تا به دمای اتاق برسند.

پس از آن مرحله دوم سیکل حرارتی آغاز می‌شود. در این مرحله، قطعات در کوره با نرخ ۵ درجه در ساعت گرم می‌شوند تا به دمای ۱۴۵° (نزدیک به  $T_g$ ) برسند و به دنبال آن، افزایش دما تا ۱۶۵ درجه با نرخ ۱ °C/h انجام می‌گیرد. بعد از رسیدن به دمای مذکور، بلافاصله خنک کاری با نرخ ۱ °C/h آغاز می‌شود تا اینکه قطعات به دمای ۱۴۵ درجه برسند و سپس خنک کاری با نرخ ۱ °C/h تا رسیدن به دمای اتاق ادامه می‌یابد. نمودار مرحله دوم این فرآیند بازپخت در شکل ۳ نشان داده شده است. در این روش، مجموع زمان لازم برای دو مرحله بازپخت در حدود ۱۳۶ ساعت/بیش از ۵ روز می‌باشد.



شکل ۳- مرحله دوم سیکل بازپخت پلی کربنات طبق مرجع [۳].

سیکل حرارتی دیگری که پیش از این برای بازپخت صفحات پلی کربنات استفاده شده است یک مرحله‌ای می‌باشد [۱۷]. روند گرم کردن و خنک کاری نمونه‌ها در این روش، طبق نمودار شکل ۴ است. در این فرآیند، قطعات به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته می‌شوند تا خشک شده و از تشکیل حباب در آنها جلوگیری شود. حداکثر دمای این سیکل ۱۵۰°C بوده و قطعه به مدت ۲/۵ ساعت در این دما نگه داشته می‌شود.

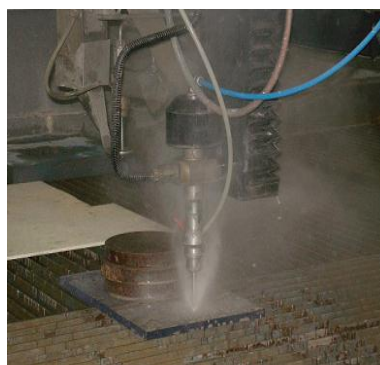
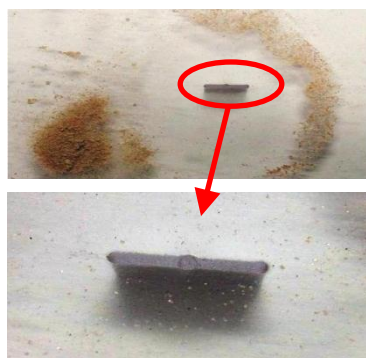
<sup>1</sup> Barlo PC

<sup>2</sup> Vishay

<sup>3</sup> GE Lexan

<sup>4</sup> PROXXON

<sup>5</sup> Water Jet



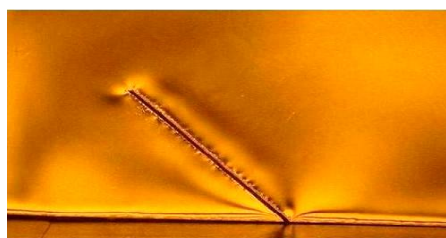
شکل ۵- تصویری از ایجاد شکاف مرکزی در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جت آب

برای ارزیابی نتایج حاصل از فرآیند پیشنهاد شده در مرجع [۳] نیز آزمایشهایی بر روی ۶ نمونه آزمایشگاهی تهیه شده از هر یک از انواع صفحات پلی‌کربنات انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این روش به خوبی قادر به رفع تنشهای پسماند و حلقه‌های هم‌تنش در اطراف محل بریدگی است، اما متأسفانه مدت انجام آن بسیار طولانی (بیش از ۵ روز) است که استفاده از آن را با مشکل مواجه می‌کند. زیرا علاوه بر افزایش زمان و هزینه‌ی بازپخت، امکان نوسان یا قطعی برق در مدت طولانی بیشتر است که در این صورت، در برنامه زمان‌بندی سیکل حرارتی اختلال ایجاد شده و قطعات داخل کوره قابل استفاده نخواهند بود.

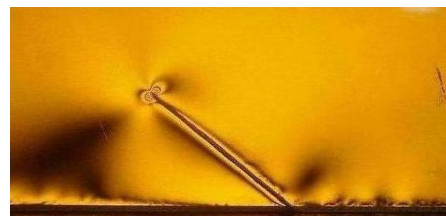
در ادامه، آزمایشهای بازپخت بر اساس فرآیند حرارتی شکل ۴ بر اساس مرجع [۱۷] بر روی ۶ نمونه با ضخامتهای گوناگون صورت گرفت. اما مشاهده شد که بیشینه دمای ۱۵۰ درجه برای رفع تنشهای موجود در این قطعات (به ویژه در قطعات ضخیم) کافی نیست و به نظر می‌رسد که این دما باید افزایش داده شود تا ماده کاملاً وارد حالت خمیری شده و تنشهای پسماند آزاد گردند.

شکل ۸ نمونه‌ای از قطعات پلی‌کربنات به ضخامت ۱۰mm را نشان می‌دهد که پس از بازپخت بر اساس سیکل حرارتی مرجع [۱۷]، توزیع و اندازه‌ی حاشیه‌های هم‌تنش مربوط به تنشهای پسماند موجود در آن تغییر چندانی نکرده است. همچنین نرخ خنک‌کاری قطعات در این روش بسیار بالا است که بر اساس مشاهدات، در ناحیه انتقال شیشه‌ای منجر به انقباض سریع و ایجاد تغییر شکل خارج صفحه‌ای به صورت اعوجاج در نمونه‌های ضخیم‌تر می‌شود.

تنش در این قطعات نشان می‌دهد که روش فوق قادر به رفع تنشهای پسماند موجود در برخی از این صفحات نبوده و گاهی تغییر شکل‌های موضعی در قطعه بوجود می‌آید که با سرد شدن قطعه، حتی سبب افزایش میزان تنشهای محبوس می‌شود. برای مثال، شکل ۷ قطعه‌ی آزمایشی موجود در شکل ۶ را نشان می‌دهد که پس از انجام عملیات حرارتی، لبه‌های شکاف دچار تغییر شکل‌های موضعی شده و در نتیجه، تنشهای پسماند به مقدار قابل توجهی افزایش یافته‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود صدمات سطحی پراکنده نیز در این قطعه ایجاد شده است که علت آن، چسبندگی سطح قطعه با سینی در مدت زمان نگهداری قطعه در بیشینه دما است.



شکل ۶- نمونه‌ای از تنش پسماند اولیه در قطعه پلی‌کربنات با ضخامت ۶mm



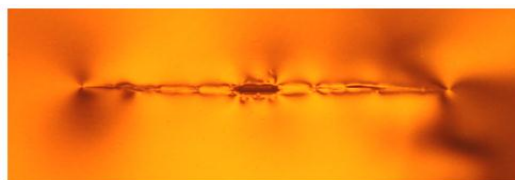
شکل ۷- افزایش تنشهای پسماند پس از بازپخت طبق مرجع [۱۸]

آزمایش‌های صورت گرفته به روش پاپلتر و سان-جیراردی [۱۸] نشان می‌دهد که با وجود رفع تقریبی تنش-های زاید از صفحات کم ضخامت (به ضخامت ۳ mm)، روش فوق کارآیی مناسبی برای رفع تنشهای پسماند در صفحات ضخیم‌تر (ضخامتهای ۶mm و ۱۰ mm) نداشته و تغییر شکلهایی نیز در این قطعات بوجود می‌آید. با توجه به اینکه تمام آزمایشهای انجام شده توسط پاپلتر [۱۹] بر روی صفحات کم ضخامت (حداکثر ۳ mm) بوده است، به نظر می‌رسد که کاربرد این فرآیند در مورد نمونه‌های ضخیم چندان مفید نیست. در واقع، قطعه باید بقدر کافی در دمای بالاتر از  $T_g$  بماند تا رهاسازی تنش<sup>۱</sup> در ساختار آن بطور موثر صورت گیرد. در این صورت عمده غیر همسانگردی در زنجیره‌ها از بین رفته و زنجیره تقریباً در وضعیت بدون بهم ریختگی<sup>۲</sup> قرار می‌گیرد [۲۰]. اما از سوی دیگر، در دماهای بالاتر از  $T_g$ ، ماده کاملاً شکل پذیر بوده و با نگه داشتن آن به مدت طولانی در یک دمای ثابت، ممکن است تغییر شکلهای موضعی در اثر وزن قطعه روی دهد. این امر در مورد صفحات ضخیم اهمیت بیشتری می‌یابد. همچنین در این حالت چسبندگی بین قطعه و سینی کوره افزایش یافته و صدمات سطحی مانند لکه بوجود می‌آید. شکل ۹ نمونه‌ای از این آسیبهای سطحی را نشان می‌دهد. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته در این پژوهش، برای اینکه قطعه در حین تنش‌زدایی در اثر وزن خود دچار تغییر شکلهای خزشی و اعوجاج نشود باید بعد از رسیدن به حداکثر مقدار دما ( $T_{max}$ ) بلافاصله کاهش دما آغاز شود.

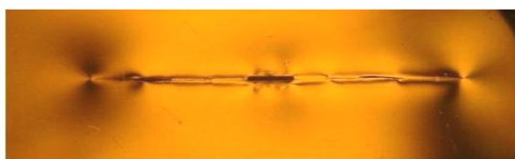


شکل ۹- آسیب در سطح نمونه پلی کربنات پس از بازپخت

پس از انجام آزمایش‌هایی در سه مرحله (طبق آنچه شرح داده شد) برای بررسی روشهای موجود، مشکلات ناشی از کاربرد هر روش برای رفع تنش پسماند و ایرادهایی که در قطعات پس از بازپخت وجود داشت مشخص شدند. با در نظر گرفتن عواملی که منجر به ایجاد این مشکلات می‌شوند، و با انجام تغییراتی کوچک در سیکل‌های موجود، سیکل‌های حرارتی اصلاح شده‌ای برای صفحات پلی کربنات در نظر گرفته شد. سپس با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های سعی و خطا بر روی قطعات، نتایج این تغییرات بررسی شد که جزئیات آن در ادامه شرح داده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۸- تنشهای پسماند در قطعه پلی کربنات به ضخامت ۱۰mm (الف) قبل از بازپخت، (ب) بعد از بازپخت بر اساس مرجع [۱۷]

#### ۴- بحث روی نتایج و تصحیح فرآیندهای بازپخت حرارتی

در بخش قبل بیان شد که برای بازپخت صفحات پلی کربنات و رفع تنشهای پسماند بر اساس سه روش موجود، آزمایشهایی بر روی ۱۸ نمونه (۶ نمونه برای هر روش) انجام گرفت. در این بخش بر روی نتایج این آزمایشها بحث شده و سپس با در نظر گرفتن تمام پارامترهای موثر، فرآیند اصلاح شده برای تنش‌زدایی این ماده بررسی می‌گردد. پارامترهای مهم و تاثیرگذار در عملیات تنش‌زدایی شامل دمای بازپخت، نرخ افزایش دما در هنگام گرم کردن و سپس کاهش دما در مرحله خنک‌سازی، مدت زمان نگهداری قطعه در دمای تنش‌زدایی می‌باشند.

<sup>1</sup> Stress Relaxation

<sup>2</sup> Unperturbed State



و رفع این مشکل، نرخ خنک‌کاری نمونه‌ها کاهش داده شد. بدین منظور به جای مقدار اولیه  $29^\circ \text{C/h}$ ، از مقدار کوچکتری معادل با نرخ گرم کردن قطعات یعنی  $10^\circ \text{C/h}$  استفاده شد. با اعمال این تصحیح و اجرای فرآیند بر روی ۶ نمونه آزمایشی با ضخامت‌های مختلف، مشکل ایجاد تغییر شکل خارج صفحه‌ای در قطعات برطرف شد.

پارامتر دیگری که برای تصحیح سیکل حرارتی مورد بررسی قرار گرفت، مدت نگهداری قطعات در دمای بیشینه  $T_{max}$  بود. طبق سیکل حرارتی مرجع [۱۷] که در شکل ۴ نشان داده شد، قطعات به مدت ۲/۵ ساعت در دمای  $T_{max}$  نگه داشته می‌شوند. اجرای این فرآیند بر روی ۶ نمونه آزمایشی نشان داد که این امر در مورد قطعات با ضخامت کم ( $3 \text{ mm}$ ) تاثیر نامطلوبی بر نتایج ندارد. اما در مورد قطعات ضخیم، طولانی شدن مدت نگهداری در دمای  $T_{max}$  منجر به تغییر شکل‌های نسبی بین سطوح بالا و پایین قطعه می‌شود که به نظر می‌رسد این پدیده، از تاثیر نیروی وزن قطعات بر ماده در حالت خمیری ایجاد می‌گردد (به مرجع [۲۱] مراجعه شود). شکل ۱۰ نمونه‌ای از قطعات با ضخامت  $10 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد که در آن، پس از اعمال فرآیند بازپخت بر روی قطعه شکل ۱۰-الف)، لبه‌های شکاف طبق شکل ۱۰-ب) از هم باز شده‌اند.



شکل ۱۰-الف)



شکل ۱۰-ب)

شکل ۱۰-ب) باز شدن لبه‌های شکاف پس از بازپخت پلی‌کربنات به ضخامت  $10 \text{ mm}$ . الف) تنش‌های پسماند اولیه در اطراف شکاف مرکزی، ب) باز شدن لبه‌های شکاف پس از بازپخت

همانطور که پیش از این بیان شد، انجام فرآیند مطرح شده توسط رناتو<sup>۱</sup> [۱۷] نیز کارآیی لازم برای تنش زدایی از صفحات پلی‌کربنات مورد مطالعه را ندارد. گرچه تکرار آزمایشها برای سطوح بالاتر دمایی ( $T_{max} = 152^\circ, 154^\circ$ )، نتایج را بهبود می‌بخشد؛ اما بررسی نمونه‌ها پس از بازپخت نشان می‌دهد که نرخ بالای خنک‌کاری در محدوده ناحیه انتقال شیشه‌ای، سبب تاب برداشتن قطعات و ایجاد تغییر شکل‌های خارج صفحه‌ای می‌شود.

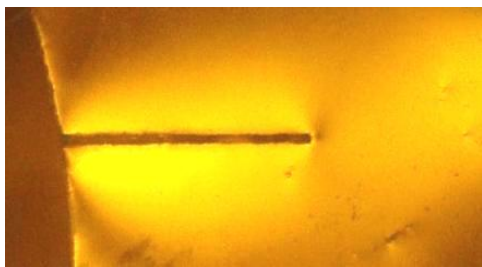
در آخرین مرحله از این پژوهش، آزمایشهایی بر مبنای اعمال تغییرات در سیکل‌های موجود انجام گرفته و سیکل‌های مختلفی بصورت سعی و خطا اجرا شدند. تغییرات انجام گرفته بر روی فرآیندهای بازپخت در کوره شامل تغییر در حداکثر دمای چرخه، مدت نگهداری در دمای  $T_{max}$  و نیز نرخ خنک‌کاری نمونه‌ها می‌باشد. هر چرخه حرارتی جدید با رعایت نکات کلیدی در فرآوری حرارتی، برای ۳ نمونه با ضخامت‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و پس از بررسی میزان تاثیر این تغییرات بر نتایج، از جمله کاهش آسیب‌های ایجاد شده مانند اعوجاج و تغییر شکل‌های ناخواسته در قطعات آزمایش و نیز مشاهده میزان رفع تنش‌های پسماند به کمک پلاریسکوپ، تصحیح دیگری اعمال می‌شود.

نحوه انجام تغییرات در سیکل‌های حرارتی به این شرح است که دمای  $T_{max}$  هر بار به اندازه  $2^\circ \text{C}$  افزایش داده می‌شود تا زمانی که محدوده مناسب برای رفع تنش‌های پسماند قطعات مشخص شود. بدین منظور فرآیندهایی با حداکثر دمای  $T_{max} = 152^\circ, 154^\circ, 156^\circ, 158^\circ, 160^\circ$  در کوره اجرا شدند. سپس با توجه به حصول نتایج بهتر در محدوده میانی این دماها (یعنی حالت  $T_{max} = 156^\circ$ ) فواصل دمایی کوچکتر در این محدوده نیز بررسی شده و فرآیندهایی با حداکثر دمای  $T_{max} = 155^\circ, 157^\circ$  بر روی نمونه‌ها آزمایش شد.

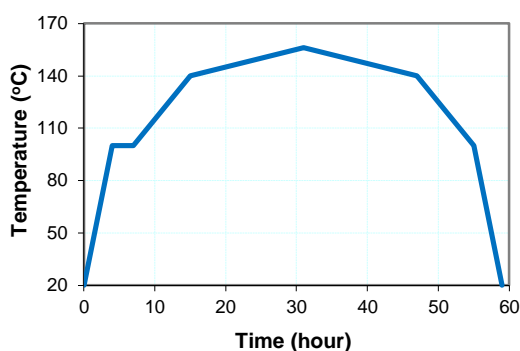
گرچه تغییر دادن  $T_{max}$  در حین این آزمایشها نتایج را برای کاهش تنش‌های پسماند بهتر کرد، اما اعوجاج و تغییر شکل خارج صفحه‌ای در لبه‌های شکاف همچنان وجود داشت. با توجه به اینکه تغییر دمایی شدید و انقباض سریع می‌تواند منجر به بروز چنین ایرادی شود، برای بررسی بیشتر

<sup>۱</sup> Renato





شکل ۱۱- نمونه‌ای از حذف تنشهای پسماند در ناحیه برشکاری و نوک شکاف، پس از انجام عملیات حرارتی پیشنهاد شده



شکل ۱۲- سیکل حرارتی پیشنهادی برای بازپخت صفحات فتوالاستیک پلی کربنات

همانطور که ملاحظه می‌شود مرحله خنک‌کاری نیز با همان نرخها در جهت کاهش دما ادامه می‌یابد. سرعت پایین کاهش دما در ناحیه انتقال از حالت مایع متعادل به حالت جامد پایدار، مانع از اعمال گرادیانهای حرارتی بالا شده و با کاهش شدت تغییر شکل‌های حرارتی، مشکل تاب برداشتن نمونه‌ها و اعوجاج‌های ناخواسته را کاملاً برطرف می‌کند. پس از آن می‌توان قطعات را با سرعت بیشتری خنک کرد که طبق آزمایشهای انجام گرفته، اعمال نرخ  $20^{\circ}\text{C/h}$  نتایج قابل قبولی خواهد داشت.

مدت انجام این سیکل در مقایسه با فرآیند موجود در مرجع [۳] به نحو مطلوبی کمتر بوده و مشاهده قطعات بازپخت شده در پلاریسکوپ نشان می‌دهد که برخلاف سیکلهای مراجع [۱۷ و ۱۸]، سیکل پیشنهاد شده قادر به رفع تنشهای زاید بدون ایجاد تغییر شکل‌های ناخواسته در قطعات است.

با وجود اینکه نگهداری نمونه‌ها در دمای  $T_{max}$  برای رفع تنش‌های پسماند در قطعات کم ضخامت مفید است اما ملاحظه می‌شود که در مورد قطعات ضخیم، با توجه به وزن بالاتر قطعه، نگهداری نمونه‌ها به مدت طولانی در دمای  $T_{max}$  باعث تغییر شکل‌های موضعی (پدیده خزش) خواهد شد. برای رفع این مشکل، مدت نگهداری قطعات در حداکثر دمای چرخه، مشابه با مرجع [۳] در نظر گرفته شده و پس از رسیدن به  $T_{max}$ ، بلافاصله خنک‌کاری قطعات آغاز شد.

اعمال این تغییر و انجام سه مرحله آزمایش مجدد بر روی نمونه‌هایی با ضخامت ۳mm، ۶mm و ۱۰mm با حداکثر دماهای  $T_{max} = 155^{\circ}, 156^{\circ}, 157^{\circ}$  نشان داد که با انجام این تصحیح، تغییر شکل‌های موضعی ناشی از وزن قطعات ایجاد نمی‌شوند. ضمناً با توجه به اینکه حداکثر دمای سیکل بالاتر از مرجع [۱۷] انتخاب شده است، تنشهای پسماند نیز به خوبی برطرف می‌شوند.

بهترین نتایج برای حذف تنشهای زاید در سیکل اصلاح شده، در دمای بیشینه  $T_{max} = 156^{\circ}$  به دست آمد. شکل ۱۱ یک نمونه از نتایج این مرحله را در پلاریسکوپ نشان می‌دهد. عدم حضور حلقه‌های هم‌تنش فتوالاستیسیته در اطراف محل برشکاری و به ویژه در نوک شکاف، نشان دهنده رفع تنشهای پسماند به نحو مطلوب است. در پایان این مرحله و بعد از انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی با هندسه و ضخامت‌های گوناگون، نتایج جمع بندی شده و در نهایت چرخه حرارتی اصلاح شده برای بازپخت صفحات پلی کربنات پیشنهاد می‌شود.

نرخ تغییر دما در بخشهای مختلف این سیکل حرارتی طبق نمودار شکل ۱۲ است، بدین صورت که نرخ افزایش دما از دمای محیط تا زمان رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه که دمای جوش آب است،  $20^{\circ}\text{C/h}$  می‌باشد. سپس قطعات به مدت ۳ ساعت در این دما نگهداشته می‌شوند تا خشک شوند و از تشکیل حباب در آنها جلوگیری شود. پس از آن افزایش دما با سرعت کمتری معادل  $5^{\circ}\text{C/h}$  انجام می‌شود تا به دمای ۱۴۰ درجه برسد که نزدیک به دمای انتقال شیشه‌ای این ماده است. در ادامه، قطعه با نرخ  $1^{\circ}\text{C/h}$  گرم‌تر می‌شود تا به آرامی از مرحله انتقال شیشه‌ای عبور کند و زنجیره‌های پلیمری در آن تدریجاً به وضعیت متعادل برسند. پس از آن خنک‌کاری نمونه‌ها آغاز می‌شود.

- modal behavior. *Phil Trans Royal Society London A* 359: 97–111.
- [9] Ya M, Xing Y, Dai F, Lu K, Lu J (2003) Study of residual stress in surface nanostructured aisi 316l stainless steel using two mechanical methods. *Surface and Coatings Technology* 168: 148–155.
- [10] Nelson DV (2010) residual stress determination by hole drilling combined with optical methods. *Experimental Mechanics* 50: 145–158.
- [11] Schajer GS (2010) advances in hole-drilling residual stress measurements. *Experimental Mechanics* 50: 159–168.
- [۱۲] عالی ح (۱۳۷۵) آشنایی با فرایندهای ساخت و تولید. انتشارات دانشگاه امام حسین.
- [13] Doyle JF (2004) *Modern experimental stress analysis*. First Ed, John Wiley & Sons, England.
- [14] DuPont™ Delrin Acetal Resin, Technical Information, USA. See also URL <http://www.plastics.dupont.com>, 2006.
- [15] McKenna GB, Simon SL (2002) The glass transition- its measurement and underlying physics, *handbook of thermal analysis and calorimetry*. SZD Cheng ed, Vol 3: Applications to Polymers and Plastics, Elsevier Science BV, Chapter 1.
- [۱۶] دالینگ ن (۱۳۸۵) رفتار مکانیکی مواد. ویرایش دوم، ترجمه: جاهد مطلق ح، غفوری آهنگر ر، کاظمی ب. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
- [17] Renato T (2001) Valutazione tramite analisi fotoelastica dei fattori di intensificazione degli sforzi per una rotaia ciccata, Masters Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- [18] Pappalettere C, Sangirardi M (1980) Determinazione sperimentale del coefficiente di concentrazione delle sollecitazioni in giunti saldati a croce, VIII AIAS National Congress, Florence, Italy, 24–27.
- [19] Pappalettere C (1984) Annealing polycarbonate sheets, *J Strain* 20(4): 179–180.
- [20] Ding Y, Ro HW, Germer TA, Douglas JF, Okerberg BC, Karim A, Soles CL (2007) Relaxation behavior of polymer structures fabricated by nanoimprint lithography, *ACS Nano* 1(2): 84–92.
- [21] Ashbey MF, Jones DRH (1980) *Engineering Materials*. Pergamon Press, England.

## ۵- جمع‌بندی

در این مقاله فرآیندهای بازپخت حرارتی ماده پلی‌کربنات مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. با انجام فرآیندهای بازپخت بر روی نمونه‌های پلی‌کربنات طبق هر یک از مراجع موجود، ملاحظه شد که روشهای موجود برای رفع تنشهای پسماند، کارایی لازم را نداشته و یا بسیار طولانی و پرهزینه هستند. سپس با انجام تغییر و تصحیح آنها و بررسی فرآیندهای گوناگون، مجموعه‌ای از عملیات بازپخت حرارتی بر روی نمونه‌هایی با ضخامتهای مختلف اجرا شد. سرانجام سیکل بازپختی استخراج شد که ضمن کاهش زمان و هزینه بازپخت، قادر به حذف تنش‌های زاید از نمونه‌های پلی‌کربنات است.

## مراجع

- [1] Quinn Plastics-Product Information. QUINN Group, at <http://www.quinn-plastics.com>, 2009.
- [2] Takahashi S, Suetsugu M, and Shimimoto AA (1987) Basic study of plastic strain freezing by photoelastic experiments. *JSME Int Journal* 30(266): 1237–1242.
- [3] Pacey MN, James MN, Patterson EA (2000) On the use of photoelasticity to study crack growth mechanisms. *The Ninth Int. Congress on Experimental Mechanics*, Orlando, USA.
- [4] Wang WC, Shih HC (2002) hybrid investigation on residual stresses induced by self-drilling screw on polycarbonate plates. *Optics and Lasers in Engineering* 38: 97–113.
- [5] Henriksen EK (1972) Residual stresses in machined surfaces. *J Applied Mechanics* 73:69–76.
- [6] Okushima K, Kakino Y (1972) A study of residual stress produced by metal cutting. *Mem Fac Eng Japan* 34: 234–248.
- [7] Scholtes B (1987) Residual stress induced by machining. *Advances in Surfaces Treatments*, 4: 59–71.
- [8] Lieven NAJ (2001) Greening P.D. effect of experimental pre-stress and residual stress on