

An Introduction to the Concept of Distortion and Shrinkage in Composites

Rouhollah Hosseini

Young Research and Elites Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University,
Tehran, Iran

Received: 15 October 2013, Accepted: 21 July 2014

Abstract

High performance composites usually consist of continuous fibers and a thermoset matrix. A well-known example is carbon fiber/epoxy composites. When this kind of material is cured, residual stresses and/or shape distortions are produced owing to thermally and chemically induced volumetric strains. The cure implies a stage where a thermoset matrix is transformed from a liquid to a solid state. It is a quite complex thermo-mechanochemical process that in addition to volumetric strains, involves heat generation and dramatic changes in mechanical properties. For manufacturing of parts with high shape tolerances, such as aircraft components, the geometry of the mould is compensated to accommodate for shape distortions. Today, this is based on thumb rules and tests are followed by trials, which are time consuming and expensive. Development of a tool for prediction of shape distortions and residual stresses is therefore an important step toward more optimized processes for manufacturing of composites. In this paper, we examine the factors affecting distortion and thermal contraction in each application. These guidelines are considered useful to reduce shrinkage and thermal distortion.

Key Words

polymer composites,
thermal contraction and distortion,
residual stresses,
epoxy,
shrinkage

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: r.hosseini.mech@gmail.com

مقدمه‌ای بر مفهوم واپیچش و جمع شدگی کامپوزیت‌ها

روح‌اله حسینی

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۳/۴/۳۰

کامپوزیت‌های کارآمد، معمولاً از الیاف پیوسته و یک ماتریس گرماسخت تشکیل شده‌اند. مثال خوبی در این باره، کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن است. در اثر پخت این ماده، تنش‌های باقی‌مانده و واپیچش به وجود می‌آیند که ناشی از کرنش‌های حجمی گرمایی و شیمیایی هستند. پخت مرحله‌ای از ساخت است که ماتریس گرماسخت از حالت مایع به حالت جامد تغییر شکل می‌دهد. این فرایند ترکیبی از تغییرات دمایی، شیمیایی و مکانیکی است که علاوه بر کرنش‌های حجمی، شامل تولید گرما و تغییرات خواص مکانیکی است. برای ساخت قطعات با رواداری زیاد، نظیر اجزای هواپیما و بالگرد، هندسه قالب طوری تغییر می‌کند که جمع شدگی و واپیچش شکل اصلی را جبران کند. امروزه بر اساس تجربه و سعی و خطا، این هندسه شناسایی می‌شود. این کار زمان‌بر و گران است. از این رو، ایجاد روش یا ابزاری برای پیش‌بینی شکل نهایی و تنش‌های باقی‌مانده مرحله مهمی برای بهینه کردن ساخت کامپوزیت‌هاست. در این مقاله، عوامل موثر بر واپیچش و جمع شدگی گرمایی بررسی و مقدار تأثیر هر یک بیان می‌شود. این رهنمودها برای کاهش جمع شدگی و واپیچش گرمایی مفیداند.

چکیده



روح‌اله حسینی

واژگان کلیدی

کامپوزیت‌های پلیمری،
جمع شدگی و واپیچش گرمایی،
تنش‌های باقی‌مانده،
اپوکسی،
جمع شدگی

مقدمه

واپیچش و جمع‌شدگی آنهاست. تنش‌های باقی‌مانده‌ای که در طول ساخت کامپوزیت‌های گرماسخت به وجود می‌آیند، اثر مستقیمی بر کیفیت محصول دارند و می‌توانند موجب مشکلات جاری و آتی شوند. جمع‌شدگی، افزون بر تغییر ناخواسته شکل و ابعاد قطعه، اثر زیانبار دیگری نیز دارد که در هنگام ساخت قطعات حساس کامپوزیتی مشکل‌آفرین می‌شود. از آنجا که قطعه در هنگام تولید داخل قالب محدود می‌شود، جمع‌شدگی گرمایی و شیمیایی منجر به ایجاد تنش‌های پسماند در داخل آن می‌شود. این تنش‌ها باعث کاهش مقاومت قطعه شده و موجب می‌شوند تا سازه در برابر آسیب‌هایی مانند خستگی، تورق و ضربه مقاومت لازم را نداشته باشد. البته تنش‌های پسماند می‌توانند بدون واپیچش نیز به وجود آیند. جمع‌شدگی حتی اگر موجب واپیچش نشود، موجب بروز تنش‌های پسماند خواهد شد. معمولاً عواملی که موجب تغییر ناخواسته ابعاد قطعه می‌شوند، موجب القای تنش‌های پسماند و ایجاد ریزترک‌ها در قطعه نیز می‌شوند. این تنش‌ها اثر مخرب بر کیفیت و طول عمر قطعه دارند [۱].

از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تنش‌های باقی‌مانده و تغییرشکل در کامپوزیت‌های کارآمد، جمع‌شدگی و واپیچش گرمایی یا گرمای ناشی از سرد شدن ماده از دمای پخت تا دمای محیط است. در این حالت، ماده تحت تأثیر ضریب انبساط گرمایی خود دچار کاهش طول یا جمع‌شدگی می‌شود. این مسئله برای لایه‌گذاری‌های سنگین و ضخیم بیشتر اهمیت دارد، چرا که ضخامت زیاد لایه‌ها مانع از دفع زودهنگام گرما می‌شود.

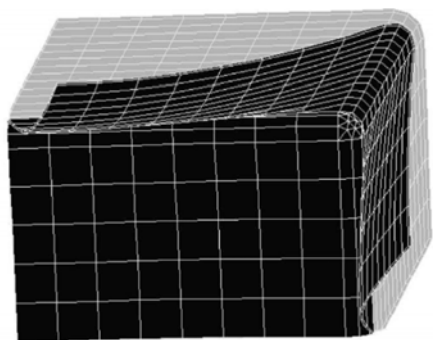
عامل دیگر واپیچش شیمیایی، ماتریس گرماسخت است که در اثر تغییر فاز از حالت مایع به جامد رخ می‌دهد. وقتی رزین مایع است، مونومرهای رزین گرماسخت، از هم جدا هستند. با انجام فرایند پخت و به هم پیوستن مونومرها (تشکیل پلیمر)، فاصله مونومرها کاهش یافته و ابعاد و به فراخور آن حجم قطعه کاهش

مواد کامپوزیتی پلیمری از الیاف محکم جا داده در یک ماتریس پلیمری تشکیل شده‌اند و مشخصاتی از قبیل وزن کم و استحکام و چقرمگی زیاد را ایجاد می‌کنند. مواد تشکیل دهنده، نوع الیاف و کسر حجمی آن و ... بر ویژگی‌های کامپوزیت اثرگذارند. الیاف کربن رایج استفاده شده عبارتند از: الیاف شیشه و الیاف کربن. الیاف کربن با چگالی کمتر استحکام بیشتری را نسبت به الیاف شیشه ایجاد می‌کنند، اما الیاف شیشه بسیار ارزان‌تراند. الیاف شیشه عایق خوبی هم هستند، بنابراین در کاربردهای الکتریکی به طور گسترده استفاده می‌شوند.

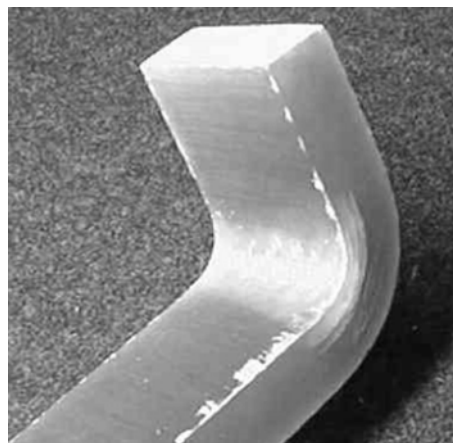
دو نوع ماتریس در کامپوزیت‌های پلیمری به کار می‌روند، یکی ماتریس‌های گرمانرم نظیر نایلون، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتراترکتون (PEEK) و دیگری ماتریس‌های گرماسخت مانند پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی.

کیفیت نهایی یک قطعه کامپوزیتی به عوامل ساخت متعددی نظیر خلل و فرج، نقاط خشک (آغشته نشده به رزین)، نقاط با دمای زیاد، ترک‌ها و واپیچش‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ بستگی دارد. بدین سبب، شناخت خوب مواد و فرایند ساخت برای جلوگیری از مسائل و مشکلات احتمالی و دستیابی به قطعاتی با کیفیت مطلوب، ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های ساخت کامپوزیت‌های گرمانرم مورد توجه افراد زیادی قرار گرفته‌اند و در دهه‌های گذشته پژوهش‌های زیادی در این باره انجام و مدل‌های زیادی ایجاد شده است. این مدل‌ها تا اندازه‌ای در ابزارهای شبیه‌سازی فرایندهای تجاری استفاده شده‌اند، اما قابلیت به‌کارگیری گسترده در کاربردهای صنعتی را ندارند.

یکی دیگر از موضوعات مرتبط با کامپوزیت‌ها که تا کنون کمتر به آن پرداخته شده است، مدل‌سازی تنش‌های باقی‌مانده و



شکل ۲- واپیچش شکلی پیش‌بینی شده در ربع مدل یک جعبه با بزرگ‌نمایی ۱۰ [۲].



شکل ۱- تورق ایجاد شده در اثر تنش‌های باقی‌مانده [۲].

می‌یابد.

در حین پخت، قطعه به وسیله قالب مقید شده و جمع‌شدگی و واپیچش گرمایی و شیمیایی منجر به ایجاد تنش باقی‌مانده می‌شوند که در برخی موارد موجب خرابی قطعه می‌شود (شکل ۱). وقتی قطعه‌ای با رواداری ابعادی زیاد ساخته می‌شود، هندسه قالب باید برای واپیچش شکلی اصلاح شود.

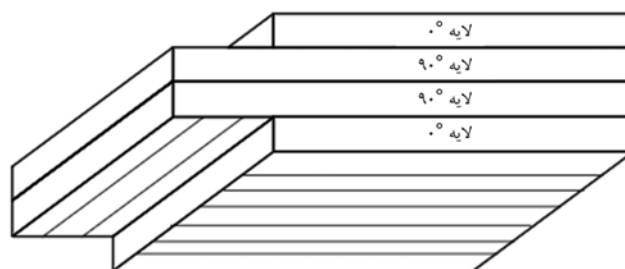
عوامل موثر بر واپیچش شکلی و تنش‌های باقی‌مانده

منبع اصلی واپیچش شکلی، انبساط یا جمع‌شدگی آزاد ماده است. مثال مشهوری در این زمینه، طول میله‌ای با ماده همگن و همسانگرد به اندازه L است که در اثر تغییر دمای ΔT به اندازه $L(1 + \alpha\Delta T)$ می‌رسد. α ضریب انبساط گرمایی ماده تشکیل دهنده میله است. بسته به ماده انتخابی، سایر پارامترها به جز دما نیز ممکن است کرنش‌های انبساطی ایجاد کنند. نوع و مقدار واپیچش شکلی که ناشی از کرنش انبساطی است، به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که در ادامه بحث می‌شود.

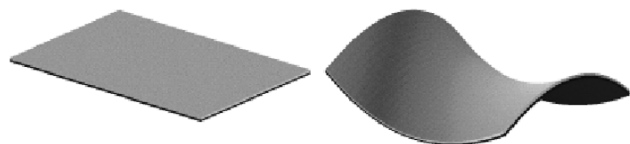
لایه‌چینی

لایه‌های کامپوزیتی با استحکام زیاد معمولاً از لایه‌های تک‌جهتی تشکیل می‌شوند که با جهت‌دهی‌های مختلف به هم چسبیده و برای دستیابی به ماده‌ای با ویژگی‌های مطلوب به هم متصل شده‌اند. شکل ۳ یک لایه‌چینی متوازن و متقارن را نشان می‌دهد. در یک پارچه متوازن، کرنش و نیروی برشی با کرنش عمود و نیرو جفت نیستند. در یک لایه‌چینی متقارن، نیروها و کرنش‌های صفحه میانی با گشتاورها و خمش جفت نیستند.

یک لایه تک‌جهتی به دلیل تفاوت در انبساط گرمایی بین الیاف و ماتریس، انبساط گرمایی به مراتب بزرگتری در جهت عمود نسبت به جهت محوری دارد [۳]. همچنین، استحکام در جهت عمود به مراتب کمتر از جهت محوری است. در اغلب مواقع مادامی که قطعه



شکل ۳- یک لایه‌چینی متقارن و متوازن [۲].



شکل ۴- واپیچش گرمایی در یک لایه‌چینی غیرمتقارن: (الف) خام و (ب) شکل یافته [۲].

با استفاده از پارچه‌های بافته شده ساخته می‌شود، واپیچش کمتر است تا هنگامی که از پارچه‌های تک‌جهتی با چیدمان نامتعارف در ساخت کمک گرفته شود. یک صفحه ساخته شده از یک لایه پارچه بافته شده، پس از خروج از قالب به ندرت تاب برمی‌دارد. این در حالی است که صفحه‌ای با چیدمان صلیبی پس از خارج شدن از قالب کج می‌شود یا تاب برمی‌دارد.

به هنگام ساخت قطعه دو نوع چیدمان وجود دارد که واپیچش را به حداقل می‌رساند:

- چیدمان شبه‌همسانگرد و

- چیدمان متقارن-متوازن.

در چیدمان متقارن-متوازن، به ازای هر لایه که در بالای خط وسط صفحه واقع باشد، یک لایه مشابه نیز در پایین و به همان فاصله از خط وسط قرار دارد. همچنین به ازای هر لایه با زاویه مثبت، یک لایه با زاویه منفی نیز وجود دارد. چیدمان شبه‌همسانگرد نیز از قرار دادن الیاف تک‌جهتی در راستاهایی به دست می‌آید که حاصل تقسیم نیم‌دایره به بخش‌های مساوی (حداقل سه بخش) است [۱].

اگر لایه‌چینی یک پارچه صفحه‌ای صاف، متوازن، اما نامتقارن باشد، پس از خارج کردن قطعه از قالب، انتظار ایجاد یک شکل خمیده یا تاب‌دار می‌رود [۳،۴]. وقتی یک لایه صفر درجه و یک لایه ۹۰ درجه باهم پخته شوند، به علت تفاوت زیاد در انبساط گرمایی بین جهات افقی و عمودی، انحنای بسیار زیاد می‌شود. این حالت در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل پایدار چنین پارچه‌ای به اندازه پارچه بستگی دارد. یک پارچه مربعی کوچک شکل زین اسبی ایجاد می‌کند و با بزرگتر شدن اندازه، شکل پایدار از حالت زین اسبی به شکل یک انحنای ساده در می‌آید [۴].

ناهمسانگردی

یک منبع دیگر در واپیچش شکلی، ناهمسانگردی یا ارتوتروپی در انبساط آزاد ماده است. همان‌طور که پیشتر بحث شد، یک صفحه با لایه‌چینی متقارن و متوازن هیچ واپیچشی نشان نمی‌دهد. یک قطعه دارای خمیدگی انحنایی ساده با لایه‌چینی متقارن و متوازن،

جدول ۱- مقایسه خاصیت جمع‌شدگی رزین‌های مختلف بدون تقویت کننده [۲].

مقدار جمع‌شدگی (%)	نوع رزین
۵-۱۰	پلی‌استر
۱-۵	اپوکسی
۱۵-۲۵	فنولی
۱۵-۲۰	سیلیکونی
۱۵-۲۰	پلی‌ایمید

درصد جمع‌شدگی رزین‌های مختلف بدون تقویت کننده در جدول ۱ نشان داده شده است.

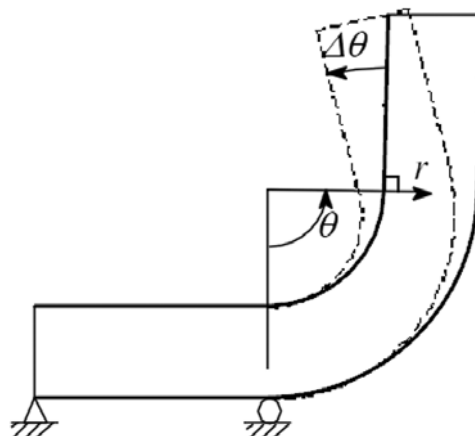
همان‌طور که از این جدول پیداست، رزین اپوکسی کمترین مقدار جمع‌شدگی را داراست و استفاده از این رزین برای بهبود خاصیت جمع‌شدگی توصیه می‌شود.

برای ساخت قطعات دقیق به روش دستی، بهترین گزینه رزین اپوکسی است. این رزین خواص مکانیکی و شیمیایی مناسب‌تری نسبت به اغلب پلی‌استرها دارد. افزون بر این، رفتار جمع‌شدگی رزین در کامپوزیت با آن چه در هنگام ریخته‌گری مشاهده می‌شود، تفاوت فاحشی دارد و درصد جمع‌شدگی در کامپوزیت بسیار کمتر از ریخته‌گری است. در واقع وجود الیاف در رزین، مقدار و شکل جمع‌شدگی را کاملاً دگرگون می‌کند [۱].

آثار انبساطی

از مهم‌ترین منابع تنش‌های باقی‌مانده و واپیچش‌های شکلی، جمع‌شدگی گرمایی است که در حین سرد کردن از دمای پخت تا دمای معمولی رخ می‌دهد [۸]. برای بیشتر سامانه‌های کامپوزیتی، الیاف، انبساط گرمایی کمتری از ماتریس پلیمری دارند. هنگام تحلیل تنش در جهت الیاف، این نتیجه برای الیاف فشاری و برای ماتریس کششی صادق است (تنش‌های باقی‌مانده در مقیاس میکرو). برای کامپوزیت‌های پارچه‌ای مسئله دشوارتر است، زیرا افزون بر کرنش گرمایی بین الیاف و ماتریس، بین خود پارچه‌ها نیز کرنش گرمایی وجود دارد.

ضریب انبساط گرمایی یک ماده گرماسخت در حالت لاستیکی در حدود ۲ تا ۳ برابر حالت شیشه‌ای است. در لایه‌چینی 90° - 0° ، این حالت اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب انبساط گرمایی در حالت صفحه‌ای ندارد. اما، اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب انبساط گرمایی ماده در جهت ضخامت دارد. برای یک کامپوزیت L شکل، حالت



شکل ۵- سطح مقطع زاویه واپیچش یافته در اثر گرما [۲].

واپیچش پیدا می‌کند. برای مثال، زمانی که ماده تحت تغییر دمای ΔT قرار گیرد، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، زاویه خارجی از θ به $\Delta\theta + \theta$ تغییر می‌یابد.

از نکاتی که در لایه‌چینی به روش دستی اهمیت دارد، درصد حباب موجود در رزین یا کامپوزیت نهایی است. وجود حباب در رزین می‌تواند همگن بودن و در نتیجه رفتار مکانیکی و گرمایی آن را تحت تأثیر قرار دهد. این مسئله می‌تواند به افزایش واپیچش بیانجامد. حباب‌گیری همواره باید به درستی انجام گیرد.

رفتار ماده حین پخت

رفتار ماده حین پخت، با بررسی رفتار پخت رزین خالص توضیح داده می‌شود. رزین پخته شده معمولاً در دمای اتاق گرانش و از زنجیرهای پلیمری خطی تشکیل شده است. در این نقطه، دمای پخت برابر صفر است. در حین فرایند پخت، زنجیرهای پلیمری خطی به هم متصل هستند و دماهای پخت و انتقال شیشه‌ای (T_g) افزایش می‌یابند.

وقتی یک شبکه بی‌نهایت شکل داده شود، پلیمر به حالت ژل می‌رسد و از حالت مایع به حالت صمغی‌مانند تغییر حالت می‌دهد [۵]. از این نقطه به بعد، ماده می‌تواند تنش را تحمل کند. در حین پخت در دماهایی زیر دمای مطلق انتقال شیشه‌ای (T_{g0})، انتقال دیگری رخ می‌دهد و آن هنگامی است که T_g پلیمر با دمای پخت برابر شود. اصطلاحاً به این عمل شیشه‌ای شدن می‌گویند [۵]. پیش از این نقطه، پلیمر شبیه صمغ است که از حالت جامد به حالت شیشه‌ای تبدیل شده است. در این دما ویژگی‌های مکانیکی ماده تغییر می‌کند. مدول یانگ و مدول برشی در حالت صمغی تقریباً ۱٪ از مدول حالت شیشه‌ای هستند. البته ضرایب انتقال گرما و مدول توده تقریباً در یک مرتبه باقی می‌مانند [۶،۷].

جدول ۲- مقایسه ضریب انبساط گرمایی رزین‌های مختلف بدون تقویت کننده [۲].

ضریب انبساط گرمایی ($^{\circ}\text{C}/10^{\circ}$)	نوع رزین
۶-۹	پلی‌استر
۴/۸-۸	اپوکسی
۶-۸	فنولی
۲-۴/۲	سیلیکونی
۵-۵/۸	پلی‌ایمید

اهمیت بیشتری دارد، زیرا قالب هر قدر بزرگتر باشد، در اثر گرما تغییر طول و انحنای بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین به علت حجم بیشتر لایه‌چینی، گرمای بیشتری در آن تولید می‌شود و از سوی دیگر به علت ضخامت بیشتر قالب، این گرما در بافت قطعه بیشتر حس می‌شود [۱].

عموماً صفحات ساخته شده از کامپوزیت‌ها در راستای ضخامت نیز شبیه راستای طول و عرض (راستای اصلی و عرضی) دچار جمع‌شدگی می‌شوند. از آنجا که معمولاً پوشش ژلی، چسبندگی خوبی به سطح قالب دارد، قطعه در سمت چسبیده به قالب، نمی‌تواند جمع شود یا جمع‌شدگی محدودی دارد. اما در سمتی از قطعه که با قالب تماس ندارد (طرف باز قطعه)، رزین می‌تواند به راحتی منقبض شده و دچار جمع‌شدگی شود. در نتیجه این اختلاف جمع‌شدگی در دو طرف سطح، قطعه تمایل به جدا شدن از سطح قالب پیدا می‌کند و به سمت داخل قالب خم می‌شود. اصولاً هر چه درصد رزین نسبت به الیاف کمتر باشد، مقدار جمع‌شدگی کاهش می‌یابد [۱].

مقدار الیاف

تغییر در کسر حجمی الیاف تقریباً بر همه خواص کشسانی و گرمایی یک لایه تک‌جهتی مؤثر است. Wiersma و همکاران [۱۳] از یک مدل کشسان استفاده کردند و اثر تغییر کسر حجمی الیاف را بر واپیچش شکلی یک قطعه L شکل ساخته شده ب‌پیش‌آغشته‌سازی بررسی کردند. تحلیل حساسیت نشان داد، تغییر انبساط گرمایی بیشترین اثر را بر واپیچش شکلی دارد. Sung و Hilton [۱۴] با آزمایش روی کربن-اپوکسی مشاهده کردند، مقدار الیاف هم بر دمای گرمادهی بیشینه و هم درجه پخت در لایه‌های ضخیم مؤثر است. مقدار کم الیاف موجب می‌شود تا گرمای زیادی بر واحد جرم در حین پخت تولید شود و قله دمای زیاد در وسط

فتری طی سرد شدن در حالت لاستیکی نسبت به حالت شیشه‌ای با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد.

اثر کرنش‌های انبساطی بر تنش در مواد گرماسخت در حالت لاستیکی در حالتی که در یک یا دو جهت مقید شده باشد، به دلیل سفتی کم است.

Lange و همکاران [۹] هیچ تنش باقی‌مانده‌ای نه در اثر جمع‌شدگی و چروک خوردن گرمایی و نه در اثر سرد شدن، در حالت لاستیکی طی پخت هم‌دمای فیلم‌های اپوکسی تا دمای انتقال شیشه‌ای مشاهده نکردند. تنها در حالت شیشه‌ای، پس از سرد شدن از دمای انتقال شیشه‌ای تا دمای معمولی، تنش‌های باقی‌مانده مشاهده شد. طی پخت جسم مقید شده حجمی، اثر جمع‌شدگی گرمایی و سرد شدن در هر دو حالت لاستیکی و شیشه‌ای اهمیت می‌یابد، زیرا مدول توده در هر دو حالت لاستیکی و شیشه‌ای مرتبه یکسانی دارند [۱۰].

یک ماده گرماسخت طی فرایند پخت به طور شیمیایی نیز جمع می‌شود. این جمع‌شدگی در اثر اتصالات خطی زنجیرهای خطی پلیمری که به سبب ایجاد سازه سه‌بعدی چگال‌تر به وجود آمده، ایجاد می‌شوند. برای نمونه Holmberg [۱۱] آزمایش‌هایی با تیر U شکل کربن-اپوکسی انجام داد. وی مشاهده کرد، جمع‌شدگی شیمیایی آثار مهمی روی واپیچش جسم ایفا می‌کند که قابل صرف‌نظر نیست. Prasatya و همکاران [۱۲] با شبیه‌سازی پخت سه‌بعدی یک رزین اپوکسی خالص نشان دادند، جمع‌شدگی پخت تا ۳۰٪ تنش باقی‌مانده نهایی را شامل می‌شود.

ضریب انبساط گرمایی رزین‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

هر چه ضریب انبساط گرمایی رزین و تقویت کننده اختلاف کمتری داشته باشند، تنش‌های پسماند کمتری در قطعه بروز می‌کند. به طور مثال، ضریب انبساط گرمایی الیاف کربن نزدیک به صفر است. این در حالی است که ضریب انبساط گرمایی الیاف شیشه بسیار بیشتر است. بنابراین می‌توان توقع داشت، تنش‌های پسماند در کامپوزیت اپوکسی-شیشه کمتر از اپوکسی-کربن باشد [۱]. همچنین برای کنترل پایداری ابعادی قطعه تولید شده، بهتر است ضریب انبساط گرمایی قالب و قطعه یکسان یا تا حد ممکن به هم نزدیک باشد. اگر مقدار انبساط و جمع‌شدگی گرمایی قالب و قطعه یکسان نباشد، رزین پس از ژل شدن دچار کش آمدن یا فشرده شدن می‌شود. این مسئله باعث ایجاد تنش‌های پسماند در رزین می‌شود. لزوم نزدیکی ضریب انبساط گرمایی قطعه و قالب، در قالب‌های بزرگ (مانند قالب‌های ساخت شناور یا قطعات هواپیما و بالگرد)

ایجاد گرانروی زیاد می‌شود که بر اشباع شدن الیاف در حین تزریق در فرایند RTM مؤثر است. جنبه دیگر قضیه این است که باید دما به اندازه کافی زیاد باشد تا فرایند ایجاد پیوند عرضی شروع شده و ادامه یابد.

همان طور که پیشتر اشاره شد، تنش‌های باقی‌مانده ایجاد شده در حالت لاستیکی در مواد گرماسخت مقید شده در یک یا دو بعد، به دلیل سفتی کم، پایین هستند. به عبارت دیگر، در حین پخت مقید حجمی، اثر هر دو پارامتر جمع‌شدگی و سرد شدن در حالت لاستیکی و شیشه‌ای مهم هستند. Plepys و Farris [۸] رزین اپوکسی را به شکل هم‌دما در 100°C در یک لوله با دیواره ضخیم پختند و ترک‌های ایجاد شده در رزین را بلافاصله پس از ژل شدن در اثر جمع‌شدگی گرمایی مشاهده کردند. برای غلبه بر این مسئله، به جای استفاده از یک مرحله زمانی پخت، رزین را در یک دمای کم ژل کردند و دما را با یک روند خطی تا 100°C افزایش دادند. در حین پخت، رزین به دلیل ضریب انبساط گرمایی زیاد آن منبسط شده و موجب ایجاد تنش فشاری می‌شود. این تنش فشاری، کشش ناشی از جمع‌شدگی گرمایی را جبران می‌کند. این روند، نه تنها برای رزین خالص مقید در سه بعد، بلکه حتی برای کامپوزیت‌های گرماسخت نیز صادق است.

به طور نظری، برای کاهش مشکلات مربوط به تنش باقی‌مانده و واپیچش شکلی، تنها پخت و ژل شدن یک کامپوزیت گرماسخت در حداقل دمای ممکن کافی نیست، بلکه باید دما را با یک روند خطی تا دمای پخت دوم افزایش داد تا جمع‌شدگی و واپیچش گرمایی در اثر این کار جبران شود.

یک جنبه دیگر قضیه، گرادیان گرمایی در حین پخت است که در پخت قطعات ضخیم‌تر، اهمیت بیشتری می‌یابد [۱۰، ۱۸]. انبساط آزاد در اثر دما و سرعت گرمایش تغییر می‌کند. افزون بر آن، تغییرات درجه پخت، منجر به تغییرات غیریکنواخت خواص مکانیکی در طول ضخامت می‌شود. جمع‌شدگی شیمیایی نیز به دلیل تغییرات دمای پخت موجب عدم یکنواختی می‌شود. گرادیان دمایی منجر به نوع دیگری از تنش باقی‌مانده و واپیچش‌های شکلی در مقایسه با لایه‌چینی نازک می‌شود. چرا که در لایه‌چینی قطعات با ضخامت کم، توزیع دما در حین پخت تقریباً یکنواخت است.

اگر عیوب قطعه بلافاصله پس از خارج کردن آن از قالب مشاهده شود، علت دمای زیاد است. اگر قطعه در هنگام خارج کردن از قالب دارای شرایط مناسبی باشد، ولی پس از مدتی تغییر شکل دهد، دلیل آن پخت ناقص قطعه در قالب است. از این رو بهتر است تا قطعه پیش از جداسازی از قالب، به طور کامل پخته شود.

جدول ۳- مقدار تأثیر عوامل ناشی از لایه‌چینی بد بر واپیچش [۲].

زیاد	توزیع نامناسب تقویت‌کننده
متوسط	درصد حجمی کم تقویت‌کننده
کم	وجود حباب

یک لایه کربن-اپوکسی ایجاد شود. این کار موجب ایجاد گرادیان در کرنش‌های انبساطی می‌شود که بر واپیچش شکلی اثرگذار است. همچنین، نوع دیگری از توزیع غیریکنواخت الیاف و ماتریس وجود دارد که به نام گرادیان توزیع الیاف مشهور است. این به معنای توزیع الیاف غیریکنواخت در طول ضخامت است که به دلیل گرادیان مربوط در خواص مکانیکی در طول ضخامت لایه‌ها، اثر زیادی بر واپیچش شکلی و تنش باقی‌مانده دارد. این پدیده در مقاطع کامپوزیتی انحنادار ساخته شده با یک نیمه قالب رایج است که در آن نازک‌شدگی گوشه‌های موضعی می‌تواند در طول ساخت پدیدار شوند.

کم بودن الیاف در مقایسه با توزیع یکنواخت آن اهمیت اندکی دارد. اگر بخشی از قطعه پررزین باشد، بسیار مستعد واپیچش است. این مسئله در هنگام لایه‌گذاری‌های سنگین و ضخیم نظیر ساخت شناورهای بزرگ اتفاق می‌افتد. توزیع غیرهمگن الیاف در زمینه به تغییر خواص مکانیکی و گرمایی و در نتیجه بروز واپیچش و ایجاد تنش پسماند می‌انجامد.

اثر عوامل ناشی از لایه‌چینی بد بر واپیچش در جدول ۳ نشان داده شده است.

چرخه پخت

یک فرایند صنعتی، اغلب هنگامی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است که زمان پخت را تا حد ممکن کاهش داده و دمای پخت افزایش داده شود تا محصول هر چه سریع‌تر تولید شود. اگر این کار بدون در نظر گرفتن تنش‌های باقی‌مانده و واپیچش شکلی انجام شود، امکان ایجاد مشکلاتی در قطعه کار و ایجاد تورق و واپیچش شکلی افزایش می‌یابد. در حالت کلی، تنش‌های باقی‌مانده و واپیچش‌های شکلی با افزایش دمای پخت، افزایش می‌یابند [۱۷-۱۲]. به طور دقیق‌تر، دمای ژل شدن که در آن پلیمر از حالت مایع به جامد تغییر حالت می‌دهد، باید تا حد امکان کاهش یابد. چرا که در واقع تفاوت بین دمای معمولی و این دما بخش گرمایی تنش‌های باقی‌مانده و واپیچش شکلی را ایجاد می‌کند. بسته به رزین انتخابی و برخی مشکلات عملی، محدودیت‌هایی درباره نحوه کاربرد دمای کم وجود دارد. برای مثال، دمای کم منجر به

به هنگام پخت، کامپوزیت پلیمری به وسیله قالب مقید شده و واپیچش شکلی با رهاسازی تنش‌های باقی‌مانده در حین خروج از قالب، شکل می‌گیرد. اگر کامپوزیت در حین پخت، برای حرکت آزاد باشد، واپیچش شکلی بدون ایجاد تنش باقی‌مانده شکل می‌گیرد (حداقل برای هندسه‌های تک‌انحنایی). مقدار واپیچش شکلی پس از پخت در این دو مورد حتی برای چرخه‌های پخت مشخص ممکن است تفاوت داشته باشد. انتظار می‌رود، قطعه آزاد از قطعه مقید، واپیچش شکلی بیشتری داشته باشد. به دلیل اینکه ممکن است در پخت مقید در حین تغییر حالت از لاستیکی به شیشه‌ای تغییر شکل در قطعه بماند.

در حین پخت نهایی قطعات آزاد و بدون قید هستند. وقتی که قطعه پس از پخت اولیه درون قالب برای اولین بار از حالت شیشه‌ای به لاستیکی تغییر حالت می‌دهد، کرنش‌های باقی‌مانده احیا شده و موجب افزایش واپیچش شکلی می‌شوند [۲۰]. این سازوکار توسط Kolkman [۲۱] مشاهده شده و Kominar [۲۲] روی آن بحث کرده است.

سطح قالب

در کاری جدید توسط Fernlund و همکاران [۲۳]، بازگشت فیزی کانال‌های C شکل ساخته شده توسط پیش‌آغشته‌های کربن-اپوکسی روی یک ابزار آلومینیمی بررسی شد. آنها دریافتند، بازگشت فیزی برای ابزاری بدون فیلم جداکننده در مقایسه با ابزاری با فیلم جداکننده ۲۰٪ کمتر است.

Cho و همکاران [۴] آزمایش‌هایی با ابزار آلومینیمی دارای سطوح صاف، زبر و لاستیکی انجام دادند. آنها نشان دادند، لیاف کربن-اپوکسی [۰/۹۰] ساخته شده با سطح صاف، بیشترین واپیچش شکلی را دارند و سطح لاستیکی کمترین واپیچش شکلی را نشان می‌دهد. آنها نتیجه گرفتند، اثر لغزش بین ابزار و پارچه‌ها در ابزار لاستیکی در مقایسه با ابزار آلومینیمی مسطح، بیشتر است.

با این وجود، این نتایج با آزمایش‌های سارازین و همکاران در تناقض است [۱۶]. در حین خلاء کیسه، آنها برای بهبود صافی سطح قالب از تفلون استفاده کردند. برای پژوهش در باره آثار لغزش روی واپیچش شکلی، آنها لیاف را با چیدمان‌های مختلف تفلون پختند. آنها نشان دادند، لایه‌های تفلون نزدیک به کامپوزیت اثر چشمگیری بر واپیچش شکلی ندارند.

ماده قالب

مشاهده شده که قالب‌های با جنس‌های مختلف، موجب ایجاد

همچنین، اگر قطعه ساخته شده در معرض دمای زیاد قرار گیرد، سطح آن ممکن است متورم شده و تغییر شکل دهد [۱].

اگر پخت ناقص باشد، جمع‌شدگی پس از خارج کردن قطعه از قالب رخ می‌دهد و تغییر شکل آن در خارج از قالب محتمل‌تر است. چرا که در قالب، پوشش ژلی با سطح قطعه در تماس است از بروز جمع‌شدگی در سطح ممانعت می‌کند. اما جدا شدن زودتر از موعد قطعه از سطح قالب (اغلب در اثر اعمال نامناسب پوشش ژلی) به ایجاد واپیچش در قطعه منجر می‌شود. چرخه پخت نامناسب به واپیچش و تنش‌های پسماند در قطعه می‌انجامد.

سرعت سرمایش

سارازین و همکاران [۱۶] دو سرعت سرمایش متفاوت (۴/۲ و ۰/۶°C/min) را در حین پخت لایه‌های پیش‌آغشته کربن-اپوکسی پس از پخت کامل به کار بردند. آنها به این نتیجه رسیدند، سرعت سرمایش کمتر منجر به واپیچش شکلی کمتر می‌شود. این نتیجه توسط وایت و هان [۱۵] برای سامانه Carbon/BMI نیز گزارش شده است. آنها به ترتیب دو سرعت سرمایش ۰/۵۶ و ۵/۶°C/min را بررسی کردند. آنها بدین نتیجه رسیدند، سرعت سرمایش کمتر پس از پخت در قالب منجر به واپیچش شکلی کمتر می‌شود. اما پس از فرایند گرمادهی مجدد، این تفاوت به صفر می‌رسد. آنها دریافتند، سرعت سرمایش کمتر، اثر رهاسازی تنش را افزایش می‌دهد. در مقاله‌ای دیگر [۱۹] آنها گزارش کردند، زمان کافی برای آزادسازی تنش باید داده شود، در غیر این حالت بخش عمده‌ای از تنش باقی‌مانده، آزاد نشده و باقی می‌ماند.

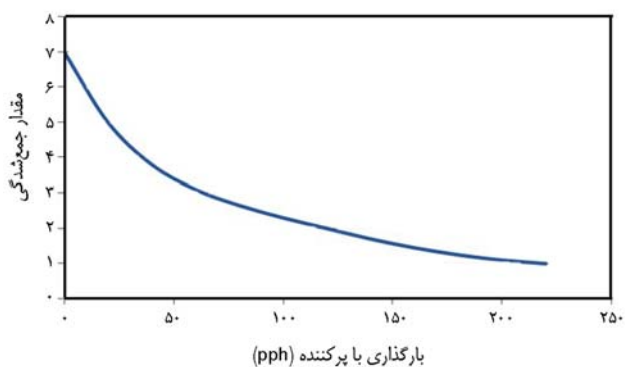
مقایسه اثر عوامل ناشی از چرخه پخت بر مقدار واپیچش و تنش پسماند قطعاتی که تحت چرخه پخت قرار می‌گیرند، در جدول ۴ آمده است.

اثر قالب و تولید

در مرجع ۱۱، Holmberg در باره ثابت نگه داشتن تغییر شکل در هنگام پخت تیر U شکل کربن-اپوکسی به وسیله قالب بحث می‌کند.

جدول ۴- اثر عوامل ناشی از چرخه پخت بد بر واپیچش [۲].

دمای پخت	زیاد
تغییرات دما و سرعت آن در حین پخت	متوسط
سرعت کاهش دما پس از پخت	متوسط
مدت زمان پخت	کم



شکل ۶- نمودار اثر افزودن مواد کاهنده جمع‌شدگی بر کاهش جمع‌شدگی رزین [۲].

ماده به راحتی می‌تواند تغییر شکل دهد. همین اختلاف در آزادی حرکت باعث می‌شود که قطعه دچار واپیچش شود.

استفاده از مواد کاهنده جمع‌شدگی

با اضافه کردن افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی به رزین، می‌توان جمع‌شدگی در حین پخت را کاهش داد. نوع و مقدار مصرف افزودنی با توجه به نوع رزین معین می‌شود. این مواد اغلب از جنس پلیمرهای گرمانرم هستند که از جمله آنها می‌توان به پلی‌استیرن، پلی‌وینیل‌استات و پلی‌اتیلن، پلی‌کاپرولاکتون‌ها و پلیمرهای آکریلیک اشاره کرد. در ارتباط با سازوکار عمل این مواد، عقیده بر آن است که پلیمرهای یاد شده، حفره‌های ریزی در رزین پخت شده ایجاد می‌کنند. این پلیمرها در حین فرایند پخت رزین منبسط شده و پس از سخت شدن رزین، منقبض می‌شوند و در اطراف آنها حفره‌های ریزی به وجود می‌آید. مقدار توصیه شده برای استفاده از این گرمانرم‌ها ۲۰-۱۰ درصد وزنی رزین پلی‌استر است. مقدار بهینه آن به نوع رزین پلی‌استر، پلیمر گرمانرم و به ویژه اثر آن بر گرانروی سامانه بستگی دارد. به طور کلی، استفاده از مواد افزودنی کاهنده جمع‌شدگی باعث رنگ‌پذیری مشکل‌تر قطعه و چسبندگی ضعیف‌تر رنگ به سطح کامپوزیت می‌شود. همچنین، وجود حفره‌های میکروسکوپی نیز می‌تواند باعث افت خواص مکانیکی کامپوزیت شود. شکل ۶ کاهش جمع‌شدگی رزین را با اضافه کردن مواد یاد شده نشان می‌دهد. محور عمودی جمع‌شدگی و محور طولی مقدار درصد افزودنی نسبت به رزین است.

رویه محاسبه

اندازه‌گیری مقدار جمع‌شدگی با استاندارد ASTM D955 انجام می‌شود. این استاندارد برای اندازه‌گیری مقدار جمع‌شدگی قطعات

واپیچش‌های شکلی مختلف می‌شوند. سارازین و همکاران [۱۶] با پختن الیاف در قالب‌های آلومینیمی و سرامیکی در این باره پژوهش کردند. آنها دمای سطح الیاف را کنترل کردند، به طوری که برای هر دو قالب شرایط یکسان بود. این پژوهشگران با تغییر دما، توانستند به اشکال یکسان دست یابند. از این رو نتیجه گرفتند که به احتمال زیاد، ضریب انتقال گرمای رسانایی که روی دمای قطعه اثرگذار است، می‌تواند واپیچش‌های شکلی را تغییر دهد. بنابراین، گرم کردن و سرد کردن قالب بر واپیچش‌های شکلی و تنش‌های باقی‌مانده مؤثر است.

شعاع گوشه‌های قالب

Holmberg [۱۱] با تحلیل و آزمایش روی تیرهای U شکل ساخته شده با RTM نشان داد، شعاع بر زاویه بازگشت فنی یک ماده همسانگرد اثر ندارد. این نتیجه با معادله (۱) هم‌خوانی دارد. به هر حال، وقتی یک تیر با اتوکلاو ساخته می‌شود، فقط یک نیمه از قالب سفت می‌شود. این کار موجب نازک شدن گوشه در حین فرایند می‌شود [۲۳] و تغییر ضخامت یعنی تغییر کسر حجمی الیاف که بر بازگشت فنی مؤثر است. Radford و Rennick [۵] مشاهده کردند، شعاع گوشه بزرگتر موجب اثر فرایند کمتر به غیر از جمع‌شدگی گرمایی بر واپیچش شکلی می‌شود.

مقدار خلل و فرج

دو دلیل عمده برای ایجاد خلل و فرج وجود دارد [۲]. اول هوای احاطه شده و دوم خلل و فرج‌های ایجاد شده با تبخیر در حین چرخه پخت هستند. مقدار تخلخل و توزیع آنها به کسر حجمی الیاف، ویژگی‌های رزین، روش انجام فرایند و شرایط انجام کار نظیر دما، فشار، زمان و ... وابسته است. با افزایش مقدار تخلخل، استحکام الیاف کامپوزیتی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱]. نشان داده می‌شود، سایر خواص نظیر سفتی، انبساط گرمایی و واپیچش شکلی نیز به مقدار خلل و فرج وابسته هستند.

وجود تقویتی

از موارد اجتناب ناپذیر در ساخت یک قطعه، وجود تقویت‌کننده یا بخش‌های ضخیم در قطعه است. با وجود آنکه وجود تقویت‌کننده و بخش‌های ضخیم در سازه می‌تواند به کاهش تغییر طول و زاویه منجر شود، گاه وجود آنها ممکن است خود موجب تشدید واپیچش در قطعه شود. باید توجه داشت، بخش‌های ضخیم، ماده مجاور خود را به تبعیت از خود وادار می‌کنند. اما در مناطق دورتر،

جدول ۵- اثر پارامترهای مختلف بر واپیچش شکلی [۲].

عوامل	اثر
انبساط گرمایی	زیاد
جمع‌شدگی عمل آوری (پخت)	زیاد
لایه چینی الیاف	زیاد
دمای پخت	زیاد
انبساط گرمایی قالب	زیاد
استفاده از مواد کاهنده جمع‌شدگی	زیاد
مقدار تخلخل	متوسط
گرادیان گرما	متوسط
گرادیان مقدار الیاف	متوسط
سرعت سرمایش	متوسط
زمان پخت	کم
مقدار الیاف	کم
سطح ماده قالب	کم
شعاع گوشه قالب	هیچ (بی‌اثر)
رسانش گرمایی قالب	هیچ (بی‌اثر)

حسب درصد با توجه به اختلاف قطر قالب به قطر قطعه محاسبه می‌شود.

ساده‌ترین روش برای تعیین مقدار جمع‌شدگی رزین‌ها، تعیین چگالی رزین مایع (DI) به کمک یک پیکنومتر و سپس تعیین چگالی رزین پخته شده (Ds) به روش غوطه‌وری است. در نهایت، مقدار جمع‌شدگی رزین از معادله زیر بر حسب درصد حجمی محاسبه می‌شود:

$$\text{Shrinkage}(\%) = \frac{(Ds - DI)}{DI} \times 100 \quad (2)$$

جمع‌شدگی رزین‌های پلی‌استر غیراشباع حدود ۵٪ تا ۱۲٪ حجمی است. برای تعیین مقدار جمع‌شدگی قطعات کامپوزیتی باید طبق رویه مطرح شده، نمونه‌هایی ساخته شده و آزمایش‌های لازم انجام شود. جدول ۵ اثر پارامترهای مختلف را بر واپیچش شکلی به طور خلاصه نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

تمام روابط مطرح شده در این متن یا منابع دیگر، صرفاً در باره مطالعه موردی خاصی مطرح شده و با روش آزمون و خطا به دست آمده‌اند و جنبه عمومی ندارند. از این رو، تدوین رویه‌ای کلی برای پیش‌بینی جمع‌شدگی قطعات کامپوزیتی امکان‌پذیر نیست و نیاز به ساخت چند نمونه قطعه آزمایشی برای یافتن رویه برای قطعه مورد نظر وجود دارد.

برای تعیین مقدار جمع‌شدگی قطعات کامپوزیتی باید طبق رویه مطرح شده در این گزارش و مطابق استاندارد ASTM D 955-00، نمونه‌هایی ساخته شده و آزمایش‌های لازم انجام شود.

مراجع

1. محمدرضا آبادیان، حامد پاکدل، فناوری کامپوزیت، ساخت و تولید، نشر چرتکه، بهار ۱۳۹۲.
2. Svanberg M., *Prediction of Manufacturing Induced Shape Distortions*, Doctoral Thesis, LULEA University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Sweden, 2002.

تهیه شده به روش قالب‌گیری تزریقی، فشاری یا انتقالی است. مواد در درون قالبی استوانه‌ای شکل به قطر mm ۱۰۲ و به ضخامت mm ۳/۲ ریخته می‌شود. برای قالب‌گیری مواد سخت به روش قالب‌گیری انتقالی، فشار باید در محدوده MPa ۵۵ تا MPa ۱۴۰ و برای تزریق بین MPa ۷۰ تا MPa ۱۴۰ باشد.

پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب‌گیری، قطر قطعات با دقت mm ۰/۰۲ اندازه‌گیری می‌شود که این مقدار، برابر جمع‌شدگی اولیه است. مقدار جمع‌شدگی نهایی قطعات نیز باید اندازه‌گیری شود که زمان آن ۴۸ ساعت پس از قالب‌گیری است. مقدار جمع‌شدگی بر

3. Hull D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University, London, 1988.
4. Cho M., Kim M.H., Choi H.S., Chung C.H., Ahn K.J., and Eom Y.S., A Study on the Room-Temperature Curvature Shapes of Unsymmetrical Laminates Including Slippage Effects, *J. Compos. Mater.*, **32**, 460-483, 1998.

5. Radford D.W and Rennick T.S., Separating Sources of Manufacturing Distortion in Laminated Composites, *J. Plast. Compos.*, **19**, 621-641, 2000.
6. Aronhime M.T. and Gillham J.K., Time-Temperature –Transformation (TTT) Cure Diagram of Thermosetting Polymeric Systems, *Epoxy Resins and Composites III*, Dusek K. (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, 83-113, 1986.
7. Shimbo M., Ochi M., and Shigeta Y., Shrinkage and Internal Stresses during Curing of Epoxide Resins, *J. Appl. Polym. Sci.*, **26**, 2265-2277, 1981.
8. Plepys, A.R., Farris, R.J., Evolution of Residual Stresses in Three-dimensionally Constrains Epoxy Resin, *Polymer*, **31**, 1932-1936, 1990.
9. Lange J., Toll S., Manson J.A.E., and Hult A., Residual Stress Build-up in Thermoset Films Cures above their Ultimate GLass Transition Temperature, *Polymer*, **36**, 3135-3141, 1995.
10. Bogetti T.A. and Gillespie J.W., Process-Induced Stress and Deformatios in Thick-Section Thermoset Composite Laminates, *J. Compos. Mater.*, **26**, 626-660, 1992.
11. Holmberg J.A., Influence of Chemical Shrinkage on Shape Distortion of RTM Composites, *Proc 19th International SAMPE European Conference*, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Paris, France, 621-632, 22-24 April, 1998.
12. Prasatya P., McKenna G.B., and Simon S.L., A Viscoelastic Model for Predicting Isotropic Residual Stresses in Thermosetting Materials: Effects of Processing Parameters, *J. Compos. Mater.*, **35**, 826-849, 2001.
13. Wiersma H.W., Peeters L.J.B., and Akkerman R., Prediction of Springforward in Continuous-fiber/polymer L-shaped Parts, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **29A**, 1333-1342, 1998.
14. Sung Y., Hilton H.H., Effects of Thermo-mechanical Properties of Composites on Viscosity, Temperature and Degree of Cure in Thick Thermosetting Composite Laminate during Curing Processes, *J. Compos. Mater.*, **32**, 1333-1342, 1998.
15. White S.R. and Hahn H.T., Cure Cycle Optimization for the Reduction of Processing-Induced Residual Stresses in Composite Materials, *J. Compos. Mater.*, **27**, 1352-1378, 1993.
16. Sarrazin H., Beomkeum K., Ahn S.H., and Springer G.S., Effects of the Processing Temperature and Lay-up on Spring-back, *J. Compos. Mater.*, **29**, 1278-1294, 1995.
17. Svanberg J.M. and Holmberg J.A., An Experimental Investigations on Mechanisms for Manufacturing Induced Shape Distortions in Homogeneous and Balanced Laminates, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **32**, 827-838, 2001.
18. Kim Y.K. and White S.R., Viscoelastic Analysis of Processing-induced Residual Stresses in Thick Composite Laminates, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, **4**, 361-387, 1997.
19. White, S.R. and Hahn H.T., Process Modelling of Composite Materials: Residual Stress Development During Cure, Part II Experimental Validation, *J. Compos. Mater.*, **26**, 2423-2453, 1992.
20. Nagahban M., Preliminary Results on an Effort to Characterize Thermo-mechanical Response of Amorphous Polymers in the Glass-transition Range Proc. MD-Vol. 68/AMD-Vol. 215, *Mechanics of Plastics and Plastic Composites*, ASME, 133-152, 1995.
21. Kolkman J., Testing Epoxide Castings by Thermal Analysis, *Holectecniek*, **4**, 29-35, 1974.
22. Kominar V., Thermo-Mechanical Regulation of Residual Stresses in Polymers and Polymer Composites, *J. Compos. Mater.*, **30**, 406-415, 1996.
23. Fernlund G., Rahman N., Courdji R., Bresslauer M., Poursartip A., Willden K., and Nelson K., Experimental and Numerical Study of the Effect of Cure Cycle, Tool Surface, Geometry and Lay-up on the Dimensional Fidelity of Autoclave-processed Composite Parts, *Compos. Parts A: Appl. Sci. Manufact.*, **33**, 341-351, 2002.