

Polymerization
Quarterly, 2013
Volume 3, Number 1
Pages 4-11
ISSN: 2252-0449

Heat Resistant Epoxy Resins

Sara Bajgholi*, Kobra Saadati, Ghasem Naderi, Hossein Bohendi
Iran Polymer and Petrochemical, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 18 September 2012, Accepted: 14 January 2013

Abstract

Epoxy resins are the prepolymers containing more than one oxirane ring in the structure. Under the curing process, epoxy resins are capable of being converted into cross-linked or thermoset plastics. The importance of epoxy resins is underscored due to their high thermal, chemical and dimensional resistance and also their low thermal expansion. The resins thermal resistance is related to their structures, curing agent, chloride content and curing reaction. Epoxy resins have attracted remarkable attention by growing high demand of such materials in various industrial sectors such as aerospace industry. In this paper, polymer thermal degradation and resin retrofitting against heat is studied by production of composites with nanoparticles, heat resistant polymer blends and functionalization of the epoxy resins.

Key Words

epoxy resin,
oxirane ring,
thermoset plastic,
thermal resistance,
thermal degradation

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: s.bajgholi@ippi.ac.ir

رزین‌های اپوکسی گرماقوم

سارا باجقلی*، کبری سعادت، قاسم نادری، حسین بوهندی
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۲۵

رزین‌های اپوکسی پیش‌پلیمرهایی هستند که در ساختار آنها بیش از یک حلقه اکسیران وجود دارد. این رزین‌ها پس از پخت به پلاستیک‌های گرماسخت یا شبکه‌ای شده تبدیل می‌شوند. اهمیت این رزین‌ها به جهت پایداری گرمایی، شیمیایی و ابعادی زیاد و انبساط گرمایی کم آنهاست. مقاومت گرمایی این رزین‌ها با عواملی چون ساختار رزین، نوع عامل پخت، محتوای کلر و واکنش پخت در ارتباط است. با توجه به نیاز مبرم بسیاری از صنایع از جمله صنایع هوافضا به رزین‌های گرماقوم، رزین‌های اپوکسی در بازارهای جهانی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، تخریب گرمایی پلیمرها و چگونگی مقاوم‌سازی رزین‌های اپوکسی در برابر گرما با روش‌هایی چون کامپوزیت کردن با ذرات نانو، آلیاژسازی با استفاده از پلیمرهای گرماقوم و عامل‌دار کردن رزین‌های اپوکسی بررسی می‌شود.

چکیده



سارا باجقلی



کبری سعادت



قاسم نادری



حسین بوهندی

واژگان کلیدی

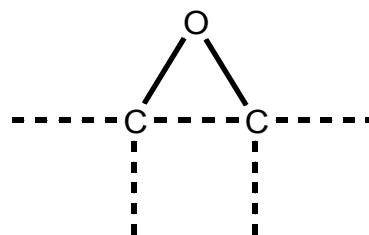
رزین اپوکسی،
حلقه اکسیران،
پلاستیک گرماسخت،
پایداری گرمایی،
تخریب گرمایی

رزین‌های اپوکسی در سال ۱۹۳۸ توسط یک شیمیدان سوئسی به نام پی‌یرکستن کشف شدند [۱]. این رزین‌ها پیش‌پلیمرهایی هستند که دو یا چند گروه اپوکسی در هر مولکول آنها وجود دارد. حلقه سه‌عضوی اپوکسی‌ها (شکل ۱) تحت عناوینی مانند اکسیران، اتوکسیلن یا گروه اپوکسی شناخته می‌شود [۲،۳].

واکنش این رزین‌ها با عوامل پخت مختلف منجر به ایجاد پلاستیک‌های گرماسخت یا شبکه‌ای می‌شود که دارای خواصی همچون استحکام مکانیکی، چقرمگی، پایداری شیمیایی عالی، خواص چسبندگی و الکتریکی مناسب هستند. با فرمول‌بندی و تغییر نحوه فراورش، گرماسخت‌های اپوکسی با طیف گسترده‌ای از خواص به دست می‌آیند که آنها را برای کاربردهای الکتریکی، عایق‌های الکترونیکی، پوشش‌های محافظ و مواد کامپوزیتی مناسب می‌کند [۲].

بیشتر رزین‌های اپوکسی تجاری مهم به‌وسیله واکنش اپی‌کلروهیدرین (C_3H_3ClO) با موادی تهیه می‌شوند که دارای حداقل دو اتم هیدروژن فعال هستند. این ترکیبات شامل ترکیبات پلی‌فنولی، مونو و دی‌آمین‌ها، آمینوفنول‌ها، امیدهای ناجورحلقه، آمیدها، دی‌ال‌ها، پلی‌ال‌های آلیفاتیک و دیم‌های اسیدهای چرب هستند.

به‌طور کلی، رزین‌های به دست آمده از اپی‌کلروهیدرین، رزین‌های اپوکسی بر پایه گلیسیدیل نام دارند [۲]. رزین‌های اپوکسی بر پایه دی‌ان‌های آلیفاتیک و سیکلوآلیفاتیک اپوکسیددار شده نیز به‌طور تجاری در دسترس‌اند. این رزین‌ها نسبت به رزین‌های گلیسیدیلی خواص الکتریکی و قابلیت عدم فرسایش بهتری در برابر هوا دارند، اما اهمیت آنها از نظر تجاری محدود شده است. تقریباً ۷۵ درصد از رزین‌هایی که در سراسر جهان استفاده می‌شوند، از دی‌گلیسیدیل اتر بیس فنول A (DGEBA) مشتق شده‌اند. این استفاده فراوان از رزین اپوکسی در بازار جهانی به دلیل ارزانی و قابلیت مصرف آن در بسیاری از



شکل ۱- ساختار گروه اپوکسی [۱].

کاربردهاست [۲].

رزین تجاری DGEBA با وزن مولکولی کم موجود، مایعی گرانبه با پایداری دمایی بیش از $200^{\circ}C$ است. برجسته‌ترین خاصیت این رزین، چسبندگی عالی آن به دلیل وجود گروه هیدروکسیل در امتداد زنجیر است. افزون بر این، رزین‌های اپوکسی پخت شده دارای خواص الکتریکی-مکانیکی مناسب، پایداری ابعادی، مقاومت شیمیایی و مقاومت گرمایی خوب هستند. با توجه به تنوع این رزین‌ها در شرایط پخت محیطی و گرمایی، از آنها در صنایع گوناگونی همچون صنایع هواپیمایی، هوافضا، ساختمان، خودرو، صنایع الکتریکی-الکترونیکی، کشتیرانی و ساختارهای کامپوزیتی مانند اعضای مصنوعی و ... استفاده می‌شود [۳].

تخریب گرمایی

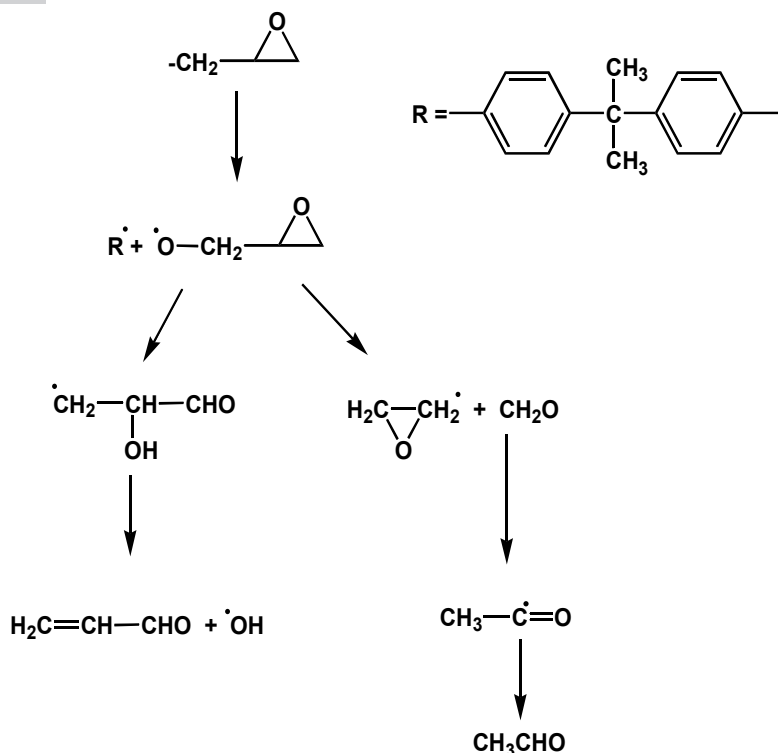
به‌طور کلی، واکنش‌هایی را که منجر به تخریب گرمایی پلیمرها می‌شوند، می‌توان به دو دسته تقسیم کرد [۴]:

الف- قطع زنجیر تصادفی و

ب- واپلیم شدن

قطع زنجیر تصادفی می‌تواند به عنوان واکنش برگشت پلیمر شدن تراکمی در نظر گرفته شود. قطع زنجیر در نقاط تصادفی در طول زنجیر اتفاق می‌افتد که قطعاتی با وزن مولکولی نسبتاً زیاد را ایجاد می‌کند. در این حالت فرض بر این است که هیچ مونومری آزاد نمی‌شود و کاهش وزن در اثر آزاد شدن محصولات فرار تقریباً قابل صرف نظر کردن است. در چنین موردی هر قطع زنجیر، مولکول پلیمری جدیدی را ایجاد می‌کند [۴].

فرایند واپلیم شدن باعث آزادسازی مونومر از انتهای زنجیر می‌شود. چنین فرایندی درست در مقابل مرحله رشد در پلیمر شدن افزایشی قرار دارد. واپلیم شدن بیشتر در پلیمرهای وینیلی و پلیمرهای ایجاد شده از مونومرهای حلقوی اتفاق می‌افتد. مانند تمام فرایندهای شیمیایی، فرایند پلیمر شدن به‌طور نظری نیز برگشت‌پذیر است. از نقطه نظر سینتیکی هنگامی که دما افزایش می‌یابد، سرعت پلیمر شدن مونومرها و واپلیم شدن به مونومرها با هم برابر است. از نظر ترمودینامیکی دمایی که در آن این اتفاق می‌افتد، حائز اهمیت است. هر یک از این واکنش‌ها یا هر دو واکنش به‌طور هم‌زمان ممکن است در زنجیر پلیمر اتفاق بیفتد. نوع پلیمر، دما، عوامل آغازکننده و سایر موارد روی این مسئله اثرگذار است [۴].



شکل ۲- سازوکار تخریب گرمایی اپوکسی‌ها ارائه شده توسط نیمن و همکاران [۳].

تخریب گرمایی اپوکسی‌ها

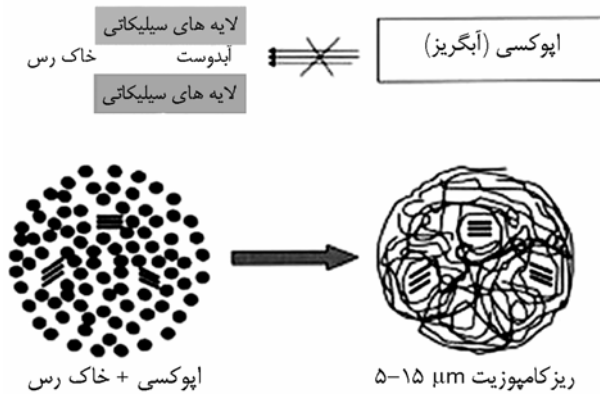
پایداری گرمایی رزین‌های اپوکسی عمدتاً به وسیله ساختار رزین، نوع عامل پخت، محتوای کلر و واکنش پخت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به طور کلی، رزین‌های اپوکسی نووالاک پایداری از رزین‌های اپوکسی بیس فنول A هستند، چرا که اتصالات متیلن در نووالاک پایداری از اتصالات ایزوپروپیلیدن در بیس فنول A هستند. عوامل پخت انیدریدی نیز عملکرد بهتری از عوامل پخت آمینی دارند. وجود باقی‌مانده کلر اثر منفی بر پایداری گرمایی اپوکسی‌ها دارد، به‌ویژه در مواقعی که از عوامل پخت آمینی استفاده شود. مطالعات زیادی روی ارتباط پایداری گرمایی با خواص فیزیکی رزین پخت شده انجام گرفته است. برای اولین بار نیمن و همکاران رابطه بین پایداری رزین‌های اپوکسی با ساختار شیمیایی آنها را بررسی کردند. این پژوهشگران تخریب گرمایی رزین اپوکسی با وزن مولکولی ۴۲۰ را که با مالئیک انیدرید پخت شده بود، آزمایش کردند. نمونه در محدوده دمایی ۲۴۰ تا ۲۵۰°C تخریب و مونواکسیدکربن و متان آزاد شده ارزیابی شد. این فرایند دارای انرژی فعال سازی ۳۴ kcal/mole است که سرعت آن با دما افزایش می‌یابد. طی تخریب گرمایی حدود ۲٪ از رزین اولیه به محصولات گازی شکل تبدیل می‌شود. ۹۸٪ باقی‌مانده شامل آب، فرمالدهید،

مواد صمغی مایع شامل اتصالات اپوکسی و باقی‌مانده‌های نامحلول هستند. محصولات مایع، رزین‌های اپوکسی با وزن مولکولی کم‌اند و محصولات گازی هیدروژن، مونواکسیدکربن، دی‌اکسید کربن، متان، اتان، اتیلن، پروپان، پروپیلن، بوتان و بوتیلن را شامل می‌شوند. نیمن و همکاران سازوکار نشان داده شده در شکل ۲ را برای تخریب گرمایی اپوکسی‌ها ارائه دادند [۳]. در ادامه باید گفت، مطالعات بیشتری برای تعیین روش‌های محتمل یا سازوکارهای دقیق در بررسی تخریب گرمایی و اکسایشی مورد نیاز است [۴].

مقاوم‌سازی رزین‌های اپوکسی در برابر گرما

مقاوم‌سازی رزین‌های اپوکسی در برابر گرما با استفاده از روش‌های گوناگونی انجام می‌گیرد که عبارتند از:
 الف- کامپوزیت کردن پلیمر با ذرات نانو،
 ب- آلیاژسازی با پلیمرهای مقاوم گرمایی،
 ج- کوپلیمر شدن (عامل‌دار کردن) رزین‌های اپوکسی و
 د- استفاده از عامل پخت.
 در ادامه تعدادی از این روش‌ها بررسی می‌شوند.

کامپوزیت کردن پلیمر با ذرات نانو



شکل ۳- تشکیل میکروکامپوزیت های اپوکسی - خاک رس [۴].

با کاتیون های بین لایه ای مثل Ca^{2+} ، Na^+ یا Mg^{2+} در تعادل است. ماهیت آبدوست خاک رس موجب می شود، مواد آلی کشش سطحی زیادی در تماس با این ماده ایجاد کنند. این پدیده باعث می شود که نفوذ رزین اپوکسی به درون صفحات سیلیکات لایه ای و توزیع یکنواخت آنها در ماتریس پلیمری مشکل باشد. به همین روش، پلیمر شدن هم زمان اپوکسی با ذرات خاک رس به جای تولید یک نانوکامپوزیت منجر به تولید میکروکامپوزیت با اندازه ذرات ۵ تا $15 \mu m$ می شود (شکل ۳) [۴].

برای کاهش آبدوستی خاک های رس لازم است که آنها را با کاتیون آلکیل آمونیوم اصلاح کرد. این کار به سادگی با روش تعویض یون قابل انجام است. نفوذ یک زنجیر آلکیل به درون لایه ها دو مزیت دارد. اول اینکه، خاصیت آبگریزی را به درون لایه القا می کند و دوم، فضای بین لایه های خاک رس را افزایش می دهد. هر دو عامل باعث آسانی نفوذ مولکول های پلیمر به درون لایه ها شده و منجر به تشکیل یک نانوکامپوزیت می شوند. مرکز تحقیقات شرکت تویوتا برای اولین بار کامپوزیت نایلون ۶-خاک رس را برای کاربرد در صنعت خودرو ارائه کرد. در ادامه، خاک رس اصلاح شده با مواد آلی برای سامانه های مختلف پلیمری به شکل تجاری توسط شرکت Nanocore تولید شد و به دنبال آن صنعت نانوکامپوزیت های پلیمری به سرعت گسترش یافت [۴].

نانوکامپوزیت های پلیمر - خاک رس، دارای پایداری ابعادی بهتر، پایداری گرمایی و مقاومت در برابر شعله هستند. خاک رس اصلاح شده با مواد آلی به راحتی می تواند با فنون ساده ای نظیر اختلاط مکانیکی، اختلاط برشی یا با استفاده از امواج صوتی در رزین های گرماسخت مایع مثل رزین اپوکسی پراکنده شود. پخت این نوع رزین ها منجر به تولید نانوکامپوزیت های اپوکسی - خاک رس می شود [۴].

کامپوزیت های تقویت شده با ذرات نانو یا نانوکامپوزیت ها، پتانسیل زیادی در زمینه دستیابی به خواص جدید ایجاد کرده اند. زیرا، خواص مطلوب اجزای آلی و غیر آلی می توانند در یک ماده با هم ترکیب شده و به طور یکنواخت در مقیاس نانو توزیع شوند. زمانی که اندازه اجزا در مقیاس نانوست، بهبود خواص به شدت افزایش می یابد. مفهوم تقویت خواص در مقیاس نانو، بر پایه افزایش چشم گیر برهم کنش بین دو فاز به دلیل سطح تماس بیشتر است. هدف اصلی ساخت نانوکامپوزیت، رسیدن به خواص معادل یا بهتر نسبت به کامپوزیت های معمولی است. اصلاح پلیمر با افزودنی های نانو بدون اینکه موجب تضعیف چقرمگی شود، می تواند سختی را بهبود دهد. همچنین این اصلاح، می تواند خواص نفوذپذیری را بهبود بخشد، بدون اینکه شفافیت را کاهش دهد یا اینکه مقاومت در برابر شعله را بدون کاهش در خواص مکانیکی و رنگ افزایش دهد [۴].

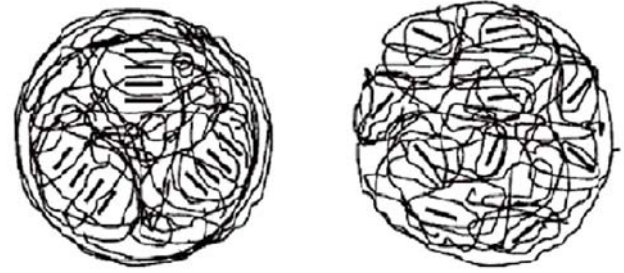
از کاربردهای نانوکامپوزیت ها می توان به موشک های بالستیک اشاره کرد. زیرا این مواد، در برابر شعله دوام قابل قبولی دارند. چنانچه تقویت با مواد نانو بتواند با سایر مواد افزودنی یا پرکننده های میکرو اثر هم افزایی داشته باشد، کامپوزیت حاصل می تواند کاربردهای گسترده تری داشته باشد و به جای مواد فلزی در کاربردهای بسیار حساس به کار روند [۴].

نانوپرکننده های مختلفی نظیر نانوسیلیکات لایه ای، نانوکلسیم کربنات، سیلیس اولیگومری چندوجهی در ساخت نانوکامپوزیت های اپوکسی به کار می روند.

رزین اپوکسی تقویت شده با خاک رس

نانوکامپوزیت پلیمر - خاک رس یا PCN، توجه زیادی را در سال های اخیر به خود جلب کرده است. دلیل عمده آن، ارزانی خاک رس و قابلیت ساختاری این ماده در شکستن و پخش شدن به لایه های اولیه ساختاری در مقیاس نانوست. فناوری PCN نسبت به سایر فناوری های نانو از ایمنی و سلامت بیشتری برخوردار است. ذرات خاک رس از یک صفحه بلور به ضخامت 0.95 nm تشکیل شده است که به هم چسبیده اند. یک لایه شامل دو صفحه چهاروجهی است تشکیل شده در یک صفحه هشت وجهی است که می تواند هیدروکسید منیزیم یا آلومینیم باشد (۲ به ۱ لایه). این لایه های ۲ به ۱ از نظر الکتروستاتیک خنثی هستند. بار اضافه لایه، در اثر جابه جایی هم شکل (isomorphic) Si^{4+} به جای Al^{3+} در صفحه چهاروجهی و Al^{3+} به جای Mg^{2+} در صفحه هشت وجهی،

خواص در آن رخ می‌دهد، به سختی امکان‌پذیر است. عامل کلیدی در رسیدن به شکل‌شناسی ورقه‌ای، مقدار نفوذ عامل پخت به واسطه اثر آن بر سرعت‌های واکنش پخت در درون و بیرون لایه‌هاست. وقتی خاک رس اصلاح شده در یک مخلوط رزین و عامل پخت پراکنده می‌شود، مخلوط رزین به درون لایه نفوذ کرده و واکنش پخت درون و بیرون لایه رخ می‌دهد. به این واکنش‌ها به ترتیب، واکنش‌های درون لایه‌ای و بیرون لایه‌ای گفته می‌شود. کاتیون آلکیل آمونیوم موجود در لایه‌ها به‌عنوان کاتالیزور در واکنش پخت اپوکسی-آمین شرکت می‌کند. بنابراین، واکنش درون لایه‌ای سریع‌تر از واکنش بیرون لایه‌ای رخ می‌دهد. این پدیده باعث می‌شود تا صفحات ذرات خاک رس بیشتر از هم جدا شده و در نتیجه مقدار ساختار ورقه‌ای بیشتر می‌شود. نتایج تجزیه پراش پرتو X (شکل ۵) نشان می‌دهد، افزایش دما به فرایند ورقه‌ای شدن ذرات خاک رس کمک می‌کند [۴]. XRD از ابزارهای مهم در تشخیص ساختار نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-خاک رس به شمار

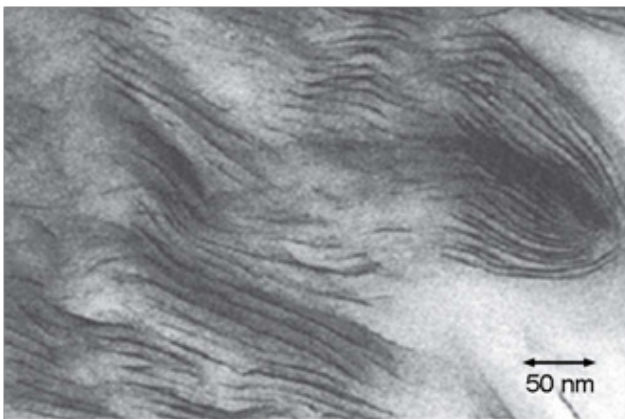


نانوکامپوزیت‌های میان لایه‌ای

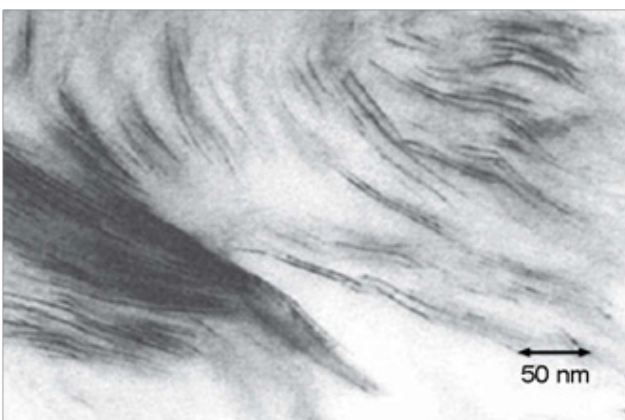
نانوکامپوزیت‌های ورقه‌ای

شکل ۴- ساختارهای ورقه‌ای و میان لایه‌ای در نانوکامپوزیت‌های پلیمری [۴].

اصل اساسی در تشکیل نانوکامپوزیت‌های گرما سخت خاک رس این است که مولکول‌های رزین و عامل پخت هر دو می‌توانند به درون فضای لایه‌ای بین صفحات سیلیکات نفوذ کنند و در این فضا با هم واکنش دهند. اصلاح خاک رس با مواد آلی، فرایند نفوذ را بهبود بخشیده و پس از پخت موجب تشکیل یک نانوکامپوزیت می‌شود. ساختارهای نانوکامپوزیت پس از پخت عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند. نانوکامپوزیت‌هایی با ساختار میان لایه‌ای که در آن زنجیرهای پلیمری درون لایه‌های سیلیکات نفوذ کرده، ولی در عین حال این صفحات نظم خود را حفظ کرده‌اند. ساختار دوم، نانوکامپوزیت‌هایی با ساختار ورقه‌ای هستند که در آنها صفحات سیلیکات به‌طور کامل از هم جدا شده و به‌طور مجزا از هم در ماتریس پلیمری پراکنده شده‌اند (شکل ۴) [۴]. در هر حال، شکل‌شناسی واقعی حاصل، ترکیبی از این دو شکل‌شناسی است. سنتز یک نانوکامپوزیت با ساختار ورقه‌ای کامل که بیشترین بهبود

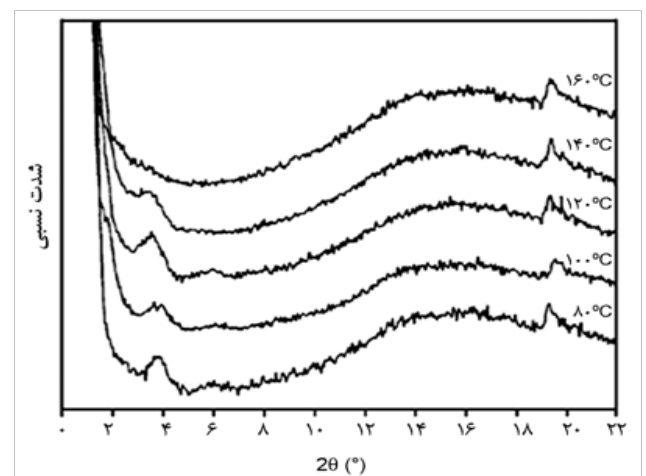


(الف)

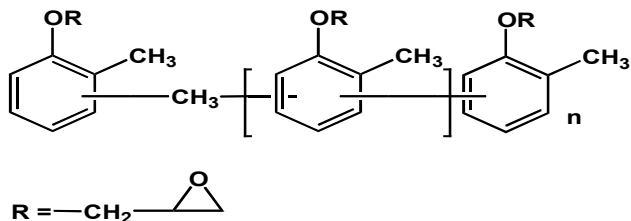


(ب)

شکل ۶- تصاویر TEM نانوکامپوزیت‌های DGEBA پخت شده در دمای: (الف) ۱۰۰ °C و (ب) ۱۶۰ °C [۴].



شکل ۵- نمودارهای XRD نانوکامپوزیت‌های رزین‌های اپوکسی شامل ۷/۵ درصد نانوخاک رس اصلاح شده با مواد آلی، پخت شده در دماهای مختلف [۴].

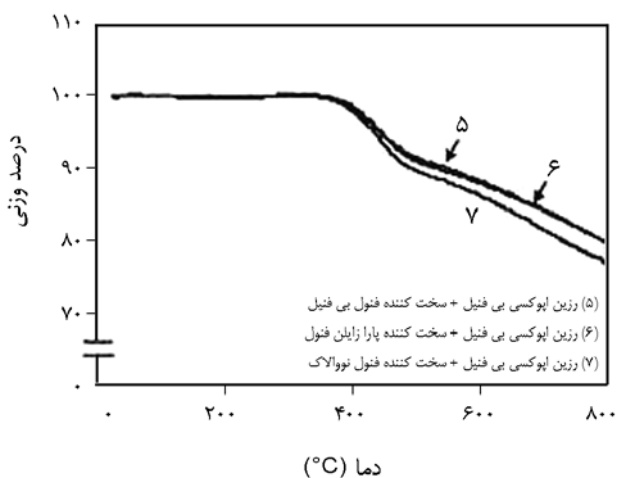


شکل ۷- رزین اپوکسی کرزول نووالاک [۶].

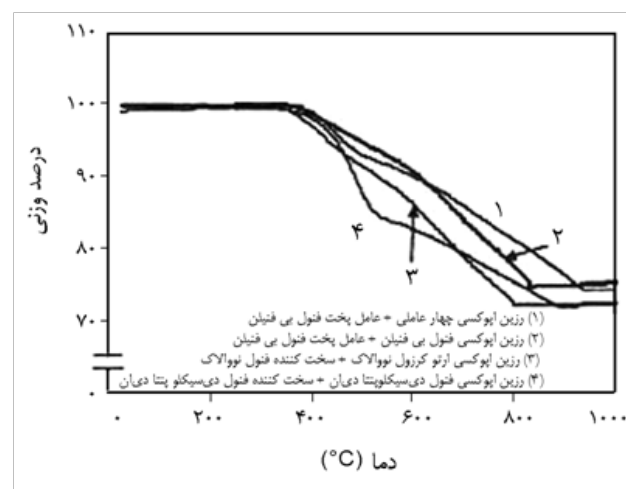
از پژوهش‌ها بوده است. آلیاژ کردن رزین‌های اپوکسی با رزین‌های گرمای مقاوم، صرف‌نظر از مقدار دست‌یابی به نتیجه مطلوب روشی آسان به‌شمار می‌رود. معمولاً این رزین‌ها پس از اختلاط پخت می‌شوند و در بهترین حالت تشکیل شبکه‌های درهم نفوذ کرده یا IPN‌ها را می‌دهند. هرچند آلیاژسازی رزین‌های اپوکسی روشی آسان به نظر می‌رسد، اما محدودیت‌ها و عدم دست‌یابی به نتیجه مورد نظر در این روش نیز موجود است [۵]. به نظر می‌رسد، عامل دار کردن این رزین‌ها با گروه‌های عاملی مشخص یا به عبارت دیگر کوپلیمر شدن آنها می‌تواند روش مؤثرتری در رسیدن به این هدف باشد.

کوپلیمر شدن (عامل دار کردن) رزین‌های اپوکسی

عامل دار کردن هم‌زمان رزین‌های اپوکسی با هدف مقاوم‌سازی در برابر گرما به‌کمک مواد مختلفی از جمله نووالاک‌ها، ترکیبات ایمیدی، ترکیبات سیلیکونی و ترکیبات آمیدی انجام می‌گیرد. به دلیل اهمیت رزین‌های نووالاک در مقاوم‌سازی گرمایی رزین‌های اپوکسی، این ترکیبات بررسی می‌شوند.



(ب)



(الف)

شکل ۸- گرمانگاشت ترکیبات رزین اپوکسی شامل مشتقات نووالاک [۷].

می‌رود. اما روش XRD نمی‌تواند سیلیکات‌های لایه‌ای شده و ورقه‌ای شده با فاصله بیش از ۹ nm را شناسایی کند. بنابراین، از فن میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) برای شناسایی ساختار این نوع نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. تصاویر TEM نانوکامپوزیت‌های DGEBA پخت شده در دماهای ۱۰۰ و ۱۶۰°C در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. هر چند نتایج روش XRD نمایانگر پراکندگی کامل است، اما روش TEM نشان می‌دهد که هنوز صفحات کاملاً جدا نشده وجود دارند. همچنین، شکل‌شناسی نانوکامپوزیت بین دو ساختار لایه‌ای و ورقه‌ای قرار دارد [۴]. وجود ذرات خاک رس در یک سامانه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن موجب کاهش ریزترک‌ها تحت بار فرکانسی می‌شود.

جدا از خاصیت تقویت‌کنندگی، وجود خاک رس به‌طور قابل توجهی مقدار نفوذپذیری آب و حلال را به درون ماتریس اپوکسی کاهش می‌دهد. به خاطر ماهیت قطبی، ماتریس اپوکسی رطوبت را جذب می‌کند که این پدیده موجب افت شدید خواص مکانیکی و چقرمگی کامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود. این مسئله مشکل اصلی استفاده از کامپوزیت‌های اپوکسی در شرایط گرما و رطوبت است. با استفاده از ذرات خاک رس در کامپوزیت‌های اپوکسی می‌توان اثر رطوبت را کاهش داد. به همین علت، کاربرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی رو به رشد است و استفاده از آنها در این نوع کاربردها در آینده‌ای نزدیک گسترش خواهد یافت [۴].

ایجاد مقاومت گرمایی در رزین‌های اپوکسی با استفاده از آلیاژسازی

مقاوم‌سازی رزین‌های اپوکسی در برابر گرما هدف اصلی بسیاری

دمای نسبتاً زیادی پیرولیز می‌شوند. در حالی که این ترکیبات از چگالی شبکه‌ای شدن کمتری برخوردارند. استفاده از گروه غیرآروماتیک دی‌سیکلوپنتادی‌ان، مقاومت به پیرولیز کمتری را حاصل می‌کند [۷].

نتیجه‌گیری

با توجه به پایداری گرمایی، ابعادی و مقاومت شیمیایی و مقاومت به خوردگی زیاد و ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی عالی رزین‌های اپوکسی، این مواد در صنایع مختلفی همچون صنایع هوافضا، صفحه‌های مدارچاپی، پوشش‌های سطوح، مواد عایق برای ساخت وسایل الکترونیکی و کامپوزیت‌های پیشرفته کاربرد دارند. با این وجود، در برخی از کاربردها مقاومت بیشتری در برابر گرما مورد نیاز است. اصلاح رزین‌های اپوکسی چه در زنجیر اصلی و چه در گروه‌های جانبی سبب بهبود خواص گرمایی و فیزیکی می‌شود. بنابراین، مطالعات بسیاری برای بهبود پایداری گرمایی این رزین‌ها انجام گرفته است و این پژوهش‌ها همچنان ادامه دارد.

مراجع

1. Curing Agents for Epoxy Resin, <http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech32.pdf>, 20 December 1990.
2. Ullmann F., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 5th ed., VCH, New York, A9, 547-553, 1985.
3. Patel V.S., Patel P.G., and Patel R.H., Novel Multifunctional Epoxy Resins, *Handbook of Polymer Blends and Composites*, Rapra Technology, UK, 299-315, 2002.
4. Ranta D., *Epoxy Composites: Impact Resistance and Flame Retardancy*, Smithers Rapra, UK, 16, 1-126, 2005.
5. Sperling L.H., *Interpenetrating Polymer Networks: An Overview*, ACS, New York, 3-38, 1994.
6. Nigam V., Saraf M.N., and Mathur G.N., Cure Characterization of Rubber Modified Epoxy Novolacs, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 49, 483-490, 1997.
7. Iji M., and Kiuchi Y., Flame-retardant Epoxy Resin Compounds Containing Novolac Derivatives with Aromatic Compounds, *Polym. Adv. Technol.*, 12, 393-406, 2001.