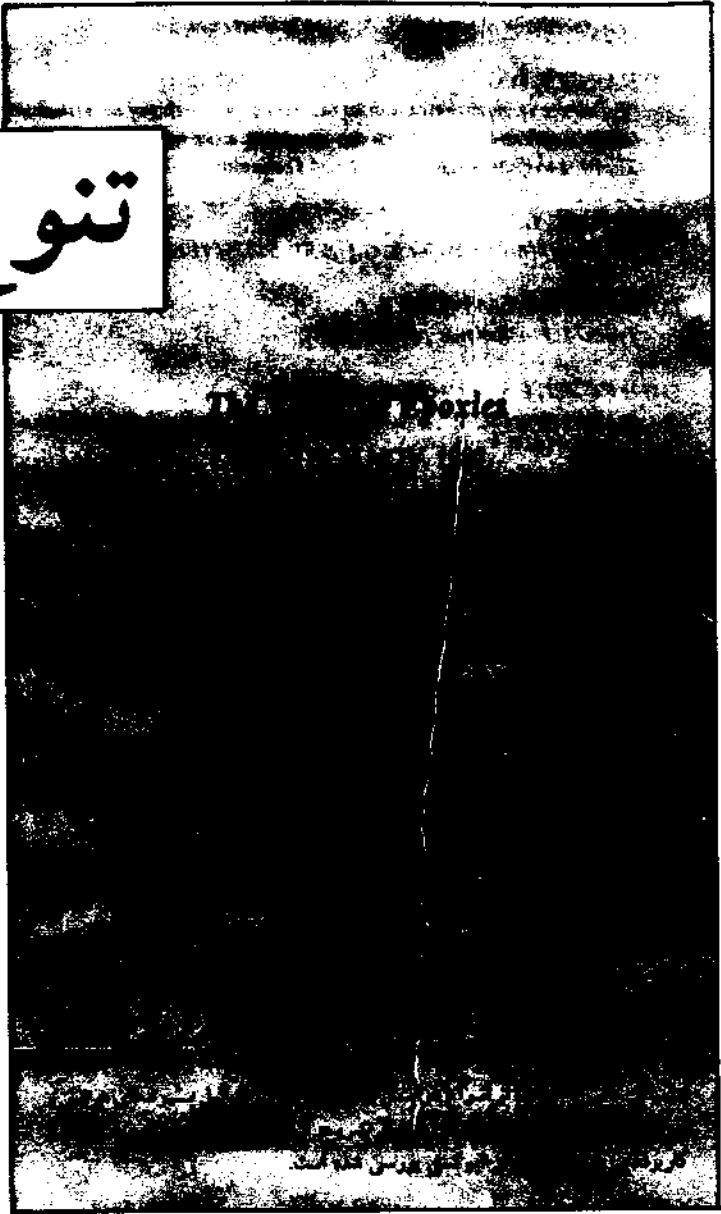
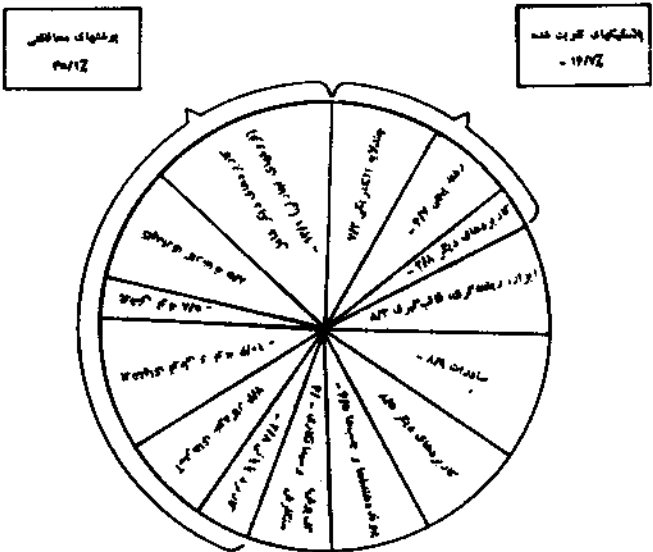


تنوع اپوکسی ها



طی پنج سال اخیر فروش رزینهای اپوکسی رشد سالیانه ۸٪ را داشته است. در سال ۱۹۷۸ تولید از مرز ۳۱۰ میلیون یوند گذشت و بازار فروش آن تقریباً به طور مساوی بین روکشهای حفاظی و کساربردهای بسایانی ساختمانی تقسیم گردید.



شکل ۱- مصرف رزین اپوکسی (۱۹۷۸). بر حسب درصد

پس از معرفی تجارتي رزینهای اپوکسی در اواخر دهه ۱۹۴۰، موقعیت آنها به عنوان قطعات ساختمانی منحصر بفرد تثبیت شد. این ترکیبات، و کاربرد وسیعی در پوششهای بسیار مؤثر، چسبها پلاستیکهای تقویت شده، دارنده رزینهای اپوکسی خانواده ای از مواد با وزن مولکولی بالا را در بر می گیرند که در اثر ترکیب با عوامل پخت، بیشتر پستی مسر شده و به پلی مرهای ترموست تبدیل می شوند. مقاومت بالا در مقابل مواد شیمیایی و حلالها، چسبندگی بسیار خوب با تعداد زیادی سوبستراها، درهم رفتگی کم به هنگام پخت، مقاومت ضربه ای خوب، انعطاف پذیری و خواص الکتریکی خوب، از مشخصات اپوکسی ها است. دامنه کاربردهای ویژه این رزینها از مورد استفاده آنها به عنوان استر درونی ۴۰ بیلیون ظروف نوشابه مصرفی در سال تا استفاده از آنها در چسبهای بسیار مؤثر و پوشش (غلاف) اجزاء الکترونیکی پیچیده در سفینه های فضائی گسترش یافته است.

Key Words:
Epoxy Resins (Types, Structure, Curing Mechanisms, Properties and Applications.)

رزینهای اپوکسی با وجود یک یا چند گروه اپوکسید (اکسیران) مشخص می‌شوند.

جدول ۱. فهرستی از اپوکسیدهای مستداول را بر حسب افزایش وزن مولکولی نشان می‌دهد.

جدول ۱: خواص رزینهای اپوکسی بر مبنای BPA

میانگین وزن مولکولی میانگین WEP [®] و اسکوزیت	تقطب، °C		
۳۵۰	۱۸۲	۸۰	-
۲۸۰	۱۸۸	۱۲۰	-
۶۰۰	۲۱۰	نیمه جامد	۴۰
۹۰۰	۲۷۵	جامد	۷۰
۱۴۰۰	۹۰۰	جامد	۱۰۰
۲۹۰۰	۱۷۵۰	جامد	۱۳۰
۳۷۵۰	۳۲۰۰	جامد	۱۵۰

WPE^{*} = (حروف اول کلمات **weight per epoxide**) یعنی مقدار رزین مورد نیاز، بر حسب گرم برای تهیه یک اکی والان مولار اپوکسید، گاهی به صورت **EEW** (وزن اکی والان اپوکسید) و **EMM** (جرم مولار اپوکسید) نیز ارجاع می‌شوند و هر سه اصطلاح، متبادل پذیرند.

اگر چه ساختارهای ترسیمی برای این نوع رزین، دی اپوکسیدها را ارائه می‌دهد، ولی رزینهای تجارتی صدها درصد اپوکسید نیستند. گروه‌های انتهایی دیگر می‌تواند از فرآیند ساخت نتیجه شود، مانند تبدیل اپوکسید به گلیکول، گروه‌های کلروهیدرین تبدیل نشده و گروه‌های انتهایی فنولی، حاصل از مولکولهای **BPA** انتهایی وارد واکنش نشده. رزینهای با وزن مولکولی کمتر ممکن است دارای عاملیت بیشتر از ۱/۹ اپوکسید در مولکول باشند، اما رزینهای جامد معمولاً محتوای اپوکسی کمتری دارند. اهمیت تأثیر عاملیت بر خواص رزین اپوکسی / اپیتیم رزین اپوکسی به‌دراست تشریح خواهد شد.

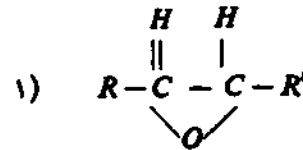
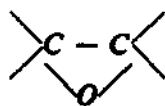
مکانیزمهای پخت

رزینهای اپوکسی، واسطه‌های واکنش پذیری هستند که برای استفاده از آنها باید با به کار بردن عوامل پخت به صورت شبکه‌های سه بعدی غیر قابل گداز، «پخت» شده یا دارای پیوند عرضی شوند. تشکیل پیوند عرضی در رزین می‌تواند از طریق گروه‌های اپوکسید یا هیدروکسیل روی دهد و اساساً به طریق زیر پیشرفت کند:

– جفت شدن مولکولهای رزین با کاتالیز کردن مستقیم.

– جفت شدن از طریق یک واسطه واکنش پذیر.

اغلب واکنشهای مورد استفاده برای پخت رزینهای اپوکسی در حلقه اپوکسید روی می‌دهد:



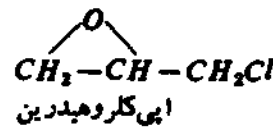
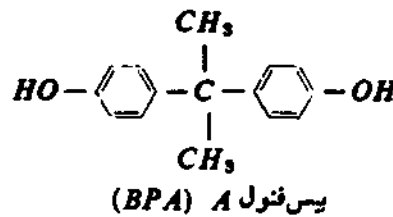
سه نوع عمده رزین اپوکسی وجود دارد:

– رزینهای اپوکسی سیکلوالیفاتیکی (R و R') قسمتی از حلقه شش عضوی اند)

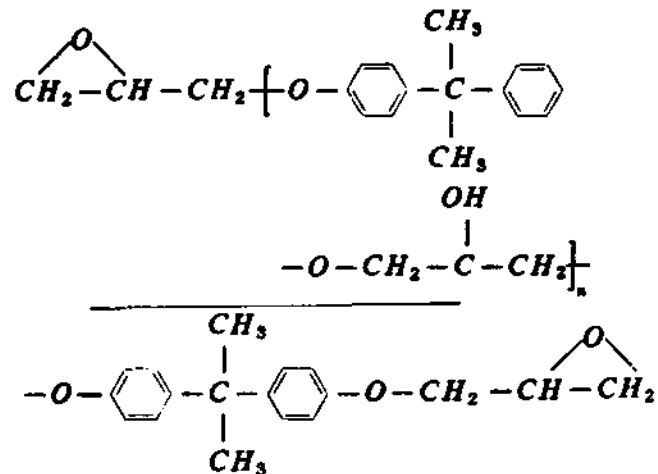
– روغنهای اپوکسیدی شده (R و R') اجزای یک اسید چرب غیر اشباع، مانند اولئیک اسید در روغن سویا می‌باشد.)

– رزینهای گلیسیدی شده (که در آنها R هیدروژن است و R' می‌تواند یک پلی‌هیدروکسی فنول یا یک اسید چند عاملی باشد).

بر اهمیت‌ترین رزینها از نظر تجاری آنها می‌باشند که از گلیسیددار کردن بیس فنول A با اپی کلروهیدرین به دست می‌آیند:



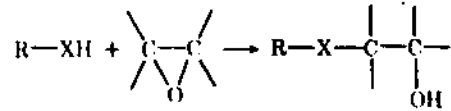
و رزینهایی با ساختار عمومی زیر می‌دهند:



طیفی از رزینهای تجارتی در دسترس است که در آنها n از صفر (سیالها) تا حدود ۲۵ (جامدات سفت و سخت) تغییر می‌کند.

علوم تکنولوژی پلیمر سال اول – شماره دوم

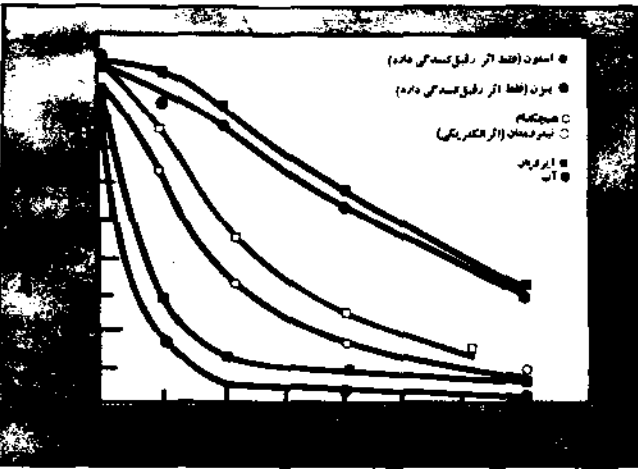
به دلیل استعداد حلقه اپوکسید در واکنش دادن در مسیرهای متعدد با انواع واکنش دهنده‌هاست که تنوع در رزینهای اپوکسی حاصل می‌شود. شیمی پخت که اکنون به کار گرفته می‌شود بر مبنای واکنشهای چند افزایشی استوار است که علاوه بر تشکیل پیوند عرضی منجر به جفت شدن نیز می‌شود. عوامل پخت از نوع RXH به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند و شامل چندین اتم هیدروژن فعال اند (مانند پلی آمینها، پلی اسیدها، پلی مرکاپتانها، پلی فنولها و غیره) [1].



معمولاً رزینهای اپوکسی و عوامل پخت، شامل بیشتر از یک محل واکنش در هر مولکول هستند، به طوریکه حین پخت منجر به تشکیل یک شبکه سه بعدی می‌شوند. واکنشهای ویژه بین واکنش دهنده‌های متفاوت و گروههای اپوکسیدی با جزئیات زیاد مطالعه و مرور شده است [2] و در این مقاله فقط به مهمترین جنبه‌های شیمی آنها اشاره می‌شود.

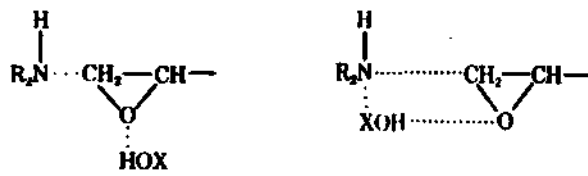
واکنشهای آمینها

عوامل پخت آمینی به حلقه اپوکسید بدون تشکیل محصولات جانبی افزوده می‌شوند. شستر^۱ و همکاران او ترتیب زیر را ارائه دادند [3].

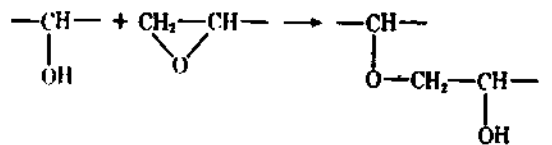
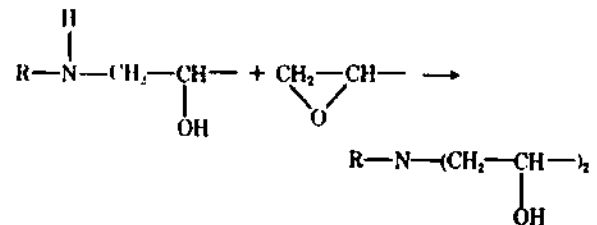
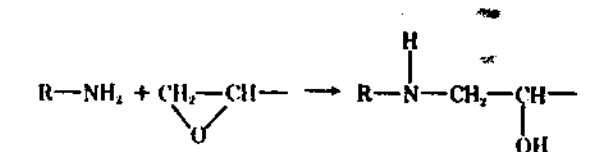
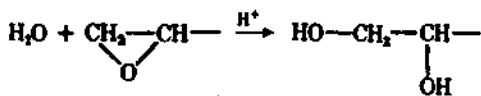
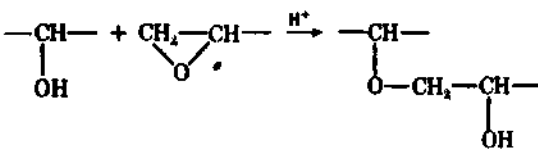
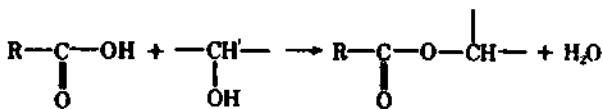
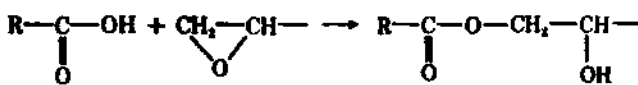


شکل ۲- اثر محیط واکنش بر روی واکنش آمین و گلیسیدیل اتر. مقادیر هم مول از دی اتیل آمین و فنیل گلیسیدیل اتر در $50^\circ C$ در حضور مقادیر مولی از حلال NB [3]. فنول حتی بیشتر از آب موجب سرعت واکنش می‌شود.

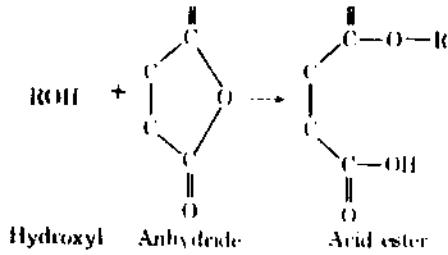
نقل قول می‌شود که ترکیبات حاوی هیدروکسیل، این واکنش را با تشکیل یک کمپلکس واسطه سه تایی تسریع می‌کند.



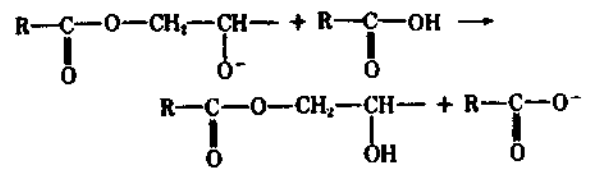
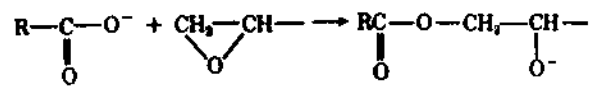
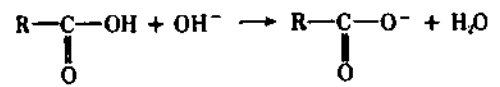
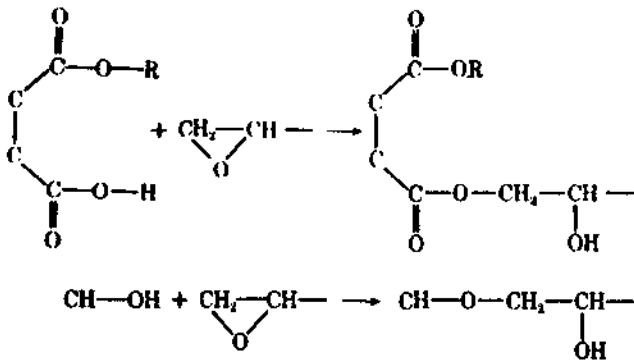
کاربرد اسید انیدریدها نسبت به استفاده از عوامل پخت آمینی، مقام دوم را از نظر اهمیت داراست. اسیدهای چند عاملی به عنوان عوامل پخت کاربرد چندانی ندارند، در هر حال کاربرد آنها برای استری کردن اپوکسیدها جنبه تجارتي پیدا کرده است. شستر و وینسترا^۱ واکنشهای زیر را بین کریوکیلیک اسید و اپوکسید پیشنهاد کردند:



در پی آن پژوهشگران دیگر [5,4] نشان دادند که واکنش (۴) با آمینها اصلاً روی نمی‌دهد، اگرچه هیدروکسیلها نقش مهمی در واکنش اپوکسید و آمین بازی می‌کنند (شکل ۲).



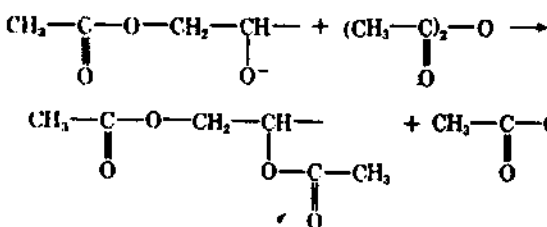
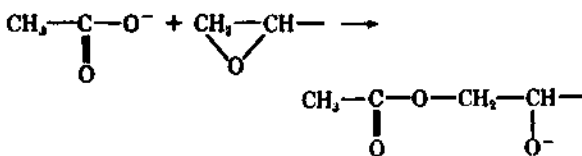
این پژوهشگران نشان دادند که اگر آب طی واکنش خارج نشود، سه واکنش اول تقریباً به نسبت ۱:۱:۲ در یک سیستم کاتالیز شده روی می‌دهد. در واکنش کاتالیز شده با باز، درجه بالاتری از گزینش پذیری برای هیدروکسی استر رخ می‌دهد، که پیشرفت آن به صورت زیر پیشنهاد شده است.



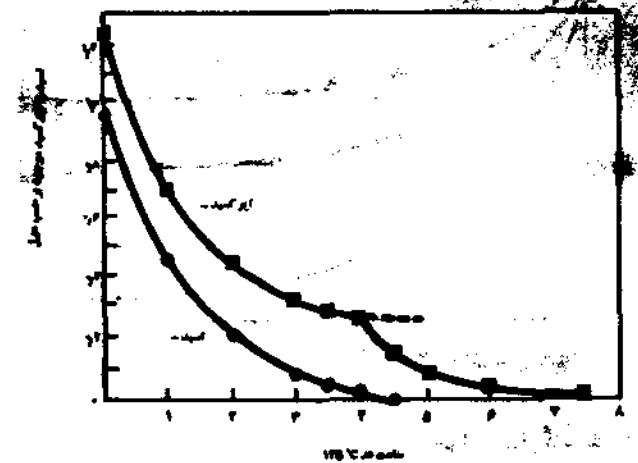
بنابراین، واکنش اساساً یک فرآیند دو مرحله‌ای است که شامل باز شدن حلقه انیدرید بوسیله یک هیدروکسیل است، که استر حاوی یک عامل اسیدی را می‌دهد و به دنبال آن گروه کربوکسیل حاصل با اپوکسید واکنش داده و هیدروکسی دی‌استر را تشکیل می‌دهد. آنگاه هیدروکسیل تولید شده از واکنش (۱۵) می‌تواند با یک انیدرید دیگر واکنش دهد و عمل به همین منوال ادامه یابد. بعضی شواهد [۹] نشان می‌دهد که در این نوع کاتالیز شدن، گروه‌های اپوکسی سریعتر از گروه‌های دی‌استر ظاهر شده، مصرف می‌شوند.

گرچه این واکنش گزینش پذیرتر از واکنش کاتالیز شده است، ولی وابستگی‌هایی به نسبت‌های واکنش‌دهنده‌های مورد استفاده وجود دارد. در صورتی که نسبت اسید به اپوکسید ۱:۱ باشد، عملاً کل محصول هیدروکسی استر است. در هر حال اگر مقدار اضافی اپوکسید وجود داشته باشد، واکنش (۷) تا مصرف کل اسید به پیش خواهد رفت و آنگاه واکنش سریعتر اپوکسید - هیدروکسیل، واکنش (۹) شروع می‌شود (شکل ۳).

واکنش‌های انیدرید - اپوکسیدی که در حضور کاتالیزور بازی صورت می‌گیرند، گزینش پذیری بیشتری نسبت به تشکیل دی‌استر دارند شستر و وینسترا [۸، ۱] نشان دادند که مقادیر مولی مساوی از استیک انیدرید و فنیل گلیسیدیل اتر، با پتاسیم استات یا آمینهای نوع سوم به عنوان کاتالیزور، با گزینش پذیری بیشتری وارد واکنش می‌شوند و برای واکنش کاتالیزور شده، به وسیله یون استات مکانیزم زیر را پیشنهاد کردند:



در مورد کاتالیز کردن به وسیله آمینهای نوع سوم، پیشنهاد شده است که واکنش از طریق باز شدن حلقه انیدرید به وسیله باز و تشکیل یک نمک درونی [۱۰] به پیش رود که در مرحله بعدی این نمک با یک اپوکسید



شکل ۳- واکنش ۱/۲۵ مول فنیل گلیسیدیل اتر با یک مول کاپریلیک اسید و ۰/۲ درصد وزنی KOH به عنوان کاتالیزور

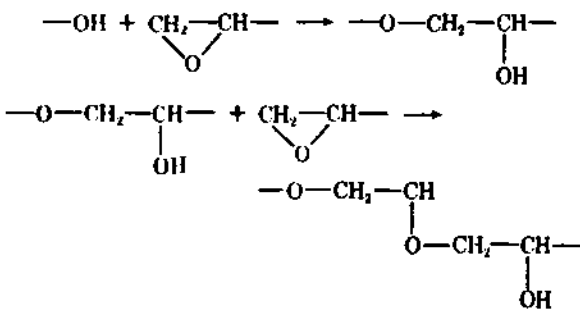
واکنش کاتالیز نشده اسیدانیدریدها، با اپوکسیدها، حتی در دمای ۲۰۰ °C نیز کند است. در هر حال واکنش با کاتالیزور اسیدی یا بازی، به سهولت و با تشکیل اتصالات استر، به پیش می‌رود. واکنش اسیدانیدریدها با رزینهای اپوکسی تجارته متداول، احتمالاً به وسیله آب یا هیدروکسی و ترکیبات کربوکسی موجود در مخلوط، شروع می‌شود. ترتیب زیر شروع واکنش را به وسیله ماده حاوی هیدروکسیل نشان می‌دهد.

علوم کونوژن پری سال اول - شماره دوم

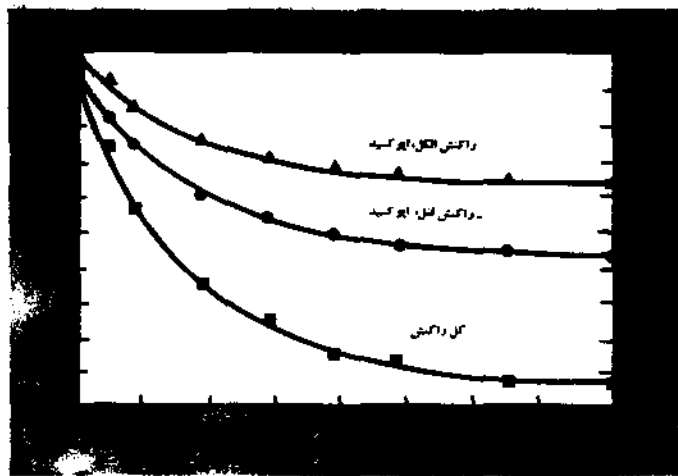
ترکیب می‌شود و یک الکوئید استر تولید می‌کند.

بادی گلیسیدیل‌اترهای بیس فنول برای تهیه رزین‌های اپوکسی بسا وزن مولکولی بالاتر مورد استفاده تجاری دارد [12].

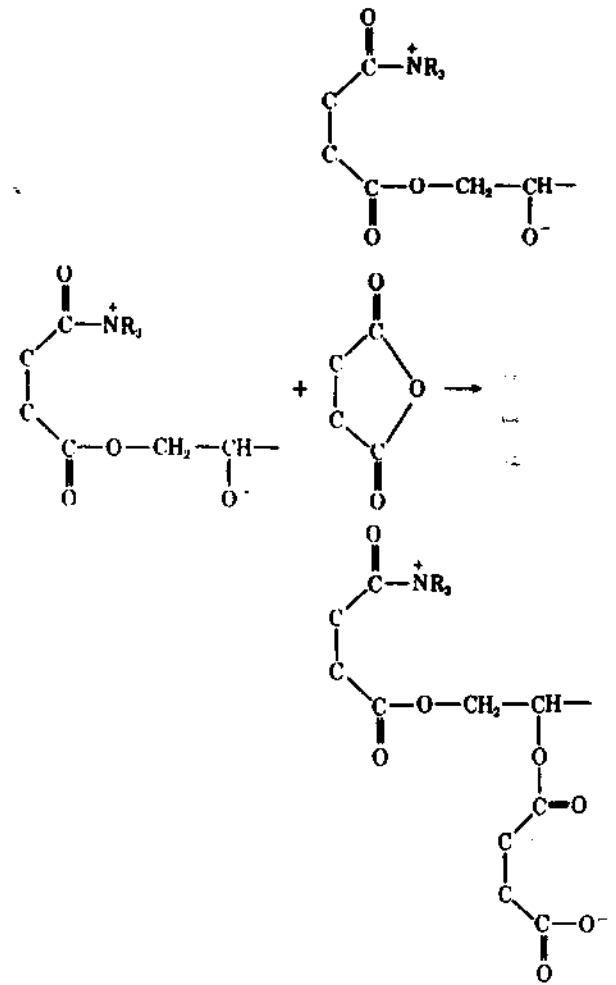
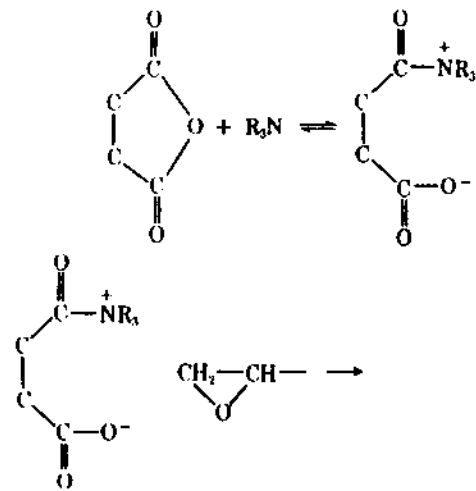
شستر و وینسترا [8] دو واکنش بین فنول و یک گلیسیدیل‌اتر را پیشنهاد کرده‌اند: واکنش فنول با اپوکسید، واکنش الکل حاصل با یک اپوکسید دیگر:



در غیاب کاتالیزور و در دمای ۱۰۰°C هیچگونه واکنشی روی نمی‌دهد، در حالیکه در دمای ۲۰۰°C، اپوکسید سریعتر از فنول ناپدید می‌شود (شکل ۴). حدود ۶۰٪ واکنش، اپوکسید-فنول و ۴۰٪ دیگر اپوکسید-الکل است این واکنش احتمالاً به وسیله فنول و از طریق تفکیک آن برای تولید پرتونها، کاتالیز می‌شود.



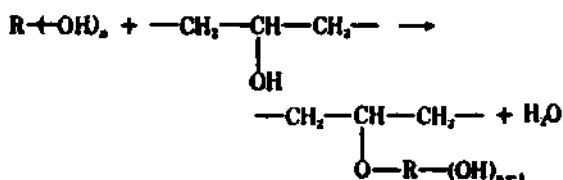
شکل ۴-واکنش کاتالیز شده مقادیر هم مولار از فنول و فنیل گلیسیدیل‌اتر واکنش کاتالیز شده بازی فنول در دمای ۱۰۰°C به سهولت و با گزینش پذیری بالا پیشرفت می‌کند. همچنانکه از شکل ۵ پیداست فنول و اپوکسید با سرعت یکسانی ناپدید می‌شوند که نشان می‌دهد اپوکسید یا فنول، یا دقیقتر با فنولات، واکنش داده و از هر گونه واکنش بین اپوکسید و الکل اساساً جلوگیری شده است. گزینش پذیری، بستگی به کاتالیزور، ترکیب دارای هیدروژن فعال که به گروه اپوکسید افزوده می‌شود، دما و متغیرهای دیگر دارد [13, 14]. هنگامی که دی‌گلیسیدیل‌اترها با فنولهای دو عاملی ترکیب می‌شوند گزینش پذیری اهمیت پیدا می‌کند، زیرا اگر واکنش از گزینش پذیری



آرنولد [11] پیشنهاد کرده است که برای بدست آوردن مناسب‌ترین خواص، بهترین نسبت برای ایندیرید/اپوکسید با کاتالیزور آمین نوع سوم نسبت ۱/۱ و بدون کاتالیزور ۱/۱۵ است. همانند کروئیکسیدیک اسیدهای چند عاملی به عنوان عوامل پخت اهمیت زیادی به دست نیآورده‌اند، در هر حال واکنش فنولها با اپوکسیدها از نظر تکنولوژی اهمیت زیادی دارد. مثلاً واکنش بیس فنولها

می‌دهد که واکنش غالب، به طور عمده خود پلی‌مریزاسیون است [8].
 کاتالیز کردن اسیدی واکنش اپوکسید - الکل دیگر گزینش پذیر نیست، هر چند گزینش پذیری با نوع و مقدار کاتالیزور، نسبت اپوکسید به الکل، حلال و دما تغییر می‌کند.

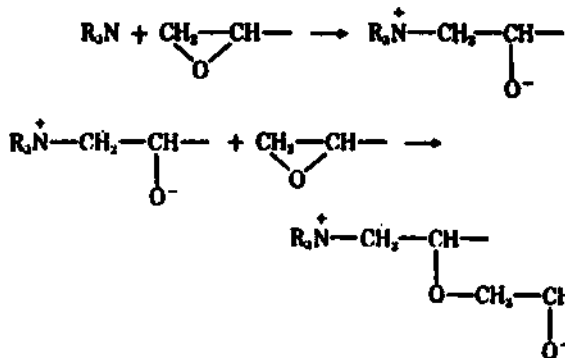
اگرچه واکنش اپوکسید - الکل برای تهیه گلیسیدیل اترهای معینی به طور صنعتی به کار می‌رود، ولی واکنش پخت مهمی نیست. پوششهای مینا گرفته از رزینهای فرمالدهید - آمینو و فنول عاملی - هیدروکسی برای پخت ترکیبهای مشابه با وزن مولکولی بالاتر از دی‌گلیسیدیل اترهای BPA در بین اولین موادی بودند که اهمیت تجاری یافتند. شیمی پخت هر دو سیستم اپوکسی - آمینو و فنولی بر مبنای واکنشهای زیر است:
 الف: واکنش رزین دارای پیوند عرضی با گروههای هیدروکسیل رزین اپوکسی:



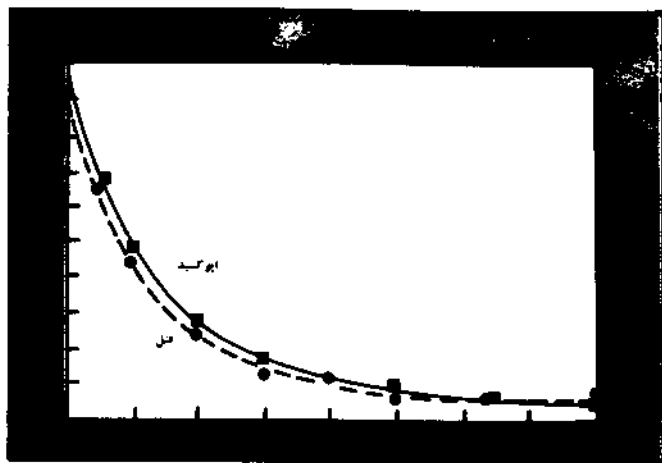
ب: واکنش رزین دارای پیوند عرضی با گروه اپوکسیدج: واکنش رزین دارای پیوند عرضی با خودش [19].

واکنشهای کاتالیزوری: واکنشهای اپوکسیدها که قبلاً مورد بحث قرار گرفت مستلزم افزودن ترکیبات حاوی یک اتم هیدروژن تغییرپذیر بود. واکنشهای کاتالیزوری به وسیله، هوموپلی مرشدن مشخص می‌شوند. گرچه هوموپلی مرشدن با استفاده از کاتالیزورهای بازی و اسیدی لوئیس به ترتیب منجر به انتشار آنیونی و کاتیونی می‌شود، ولی ساختار محصول حاصل یکسان و یک پلی‌اتر است. نتیجه پلی‌مرشدن کاتالیزوری متواپوکسیدها، پلی‌مرهای خطی است، در صورتی که دی‌اپوکسیدها شبکه‌های دارای پیوند عرضی تولید می‌کنند.

آمینهای نوع سوم از مهمترین کاتالیزورها برای اپوکسیدها هستند. این کاتالیزورها به شیوه زیر عمل می‌کنند [15, 16]:



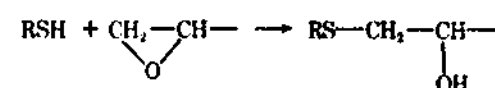
در مورد پلی‌مرشدن کاتیونی، اسیدهای لوئیس مانند PF_5 , $TiCl_4$, $SnCl_4$ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهمترین آنها از نظر تجاری BF_3 است که معمولاً به شکل کمپلکس عرضه می‌شود. واکنش از یک مکانیزم یون کربونیم پیروی می‌کند [17].



شکل ۵- واکنش کاتالیز شده با KOH با مقادیر هم مولار از فنول و فنیل گلیسیدیل اتر به علاوه ۰/۲ درصد وزنی کاتالیزور

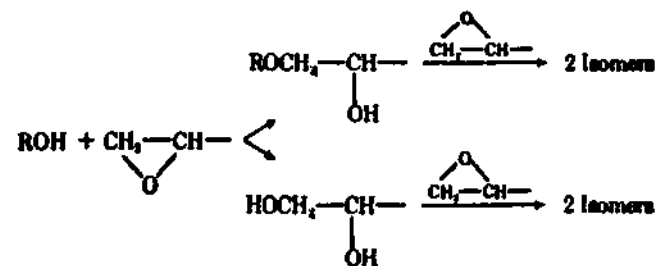
بتلایی برخوردار نباشد، محصولات شاخه‌دار یا ژلاتینی تولید می‌شود. آوی [19] گزینش پذیری تعدادی از کاتالیزورها را درجه بندی کرده است.

مرکابتانها با اپوکسیدها مانند فنولها ترکیب می‌شوند و هیدروکسیل سولفیدها را تشکیل می‌دهند.



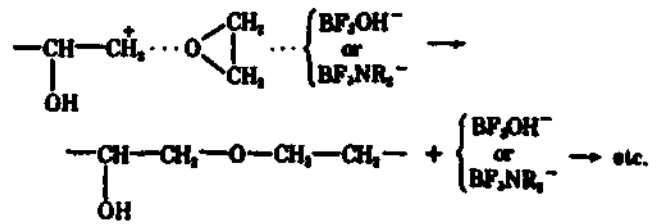
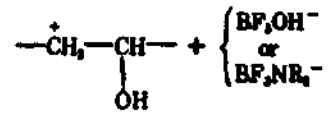
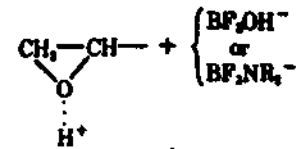
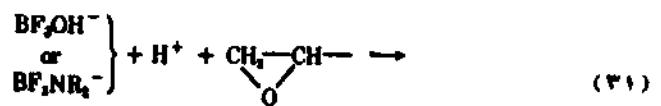
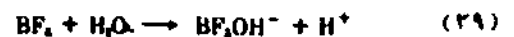
معلوم شده است که هیچگونه واکنش اپوکسید الکل با آن همراهی نمی‌کند. برای به دست آمدن شبکه‌های دارای پیوند عرضی عاملیت مرکابتان باید سه یا بیشتر باشد. واکنش اپوکسید - مرکابتان به وسیله آمینها شتاب می‌یابد.

واکنش الکلها: واکنش کاتالیز نشده اپوکسید - الکل «کند» است. به منظور تحقیق سرعت مناسب، باید تادمای $200^\circ C$ پیش رفت. واکنش با اسید یا باز کاتالیز می‌شود تا اتر الکلها حاصل شوند که این محصول با اپوکسیدهای آزاد ترکیب می‌شود و پلی‌اترها را تولید می‌کند.



در مورد مخلوطهای هم مولار از فنیل گلیسیدیل اتر و ایزوپروپیل الکل با کاتالیزور بازی معلوم شده است که بعد از مصرف تقریباً تمام اپوکسید، حدود ۸۰٪ الکل افزوده شده وارد واکنش نشده است. این امر نشان

علوم نوآوری - سال اول - شماره دوم



اثر پخت، محصولاتی با خواص فیزیکی و شیمیایی عالی که دمای ۱۴۹°C پایدار است، تولید می‌کنند.

اسید آنیدریدها: این گروه از عوامل پخت متداول‌تر از همه بعد از پلی‌آمیدها هستند. به طور کلی، اسید آنیدریدها به دمای پخت بالایی نیاز دارند، ولی مزایایی مانند دوام بیشتر و خواص الکتریکی بهتر نسبت به آمینهای آروماتیک دارند. نمونه‌های بعضی از اسید آنیدریدهایی که استفاده از آنها متداول‌تر است، عبارتند از: فتالیک^۶، تری‌ملیتیک^۷، هگزا هیدروفتالیک^۸، نادیک‌متیل آنیدرید^۹.

گستره رزینهای آمینوپلاست و فنویلاست: این گروه گستره وسیعی از رزینهای ملایم فرمالدهید، فنول‌فرمالدهید، اوره‌فرمالدهید را ارائه می‌دهند که در اثر ترکیبی از واکنشها از طریق هیدروکسیل رزین اپوکسی، خود تراکمی و واکنش از طریق گروه‌های اپوکسید، پیوند عرضی در آنها تشکیل می‌شود. این سیستمها در دماهای نسبتاً بالا پخت می‌شوند و محصولات نهایی با مقاومت شیمیایی زیاد تولید می‌کنند. در ضمن، انواع متفرقه‌ای از عوامل پخت مانند دی‌مرکاپتانها^{۱۰}، دی‌سیانیدآمیدها^{۱۱}، دی‌هیدرازیدها^{۱۲} و گوان آمینها^{۱۳} کاربرد محدودی در صنعت پیدا کرده‌اند. بجز دی‌سیانید آمید که کاربرد وسیعی در چندانسه‌های الکتریکی و پوششهای پودری پیدا کرده است، بقیه مواد فقط حجم کمی از کل عوامل پخت در بازار را تشکیل می‌دهند.

محصولات رزینهای اپوکسی

اهمیت استوکیومتری در تشکیل شبکه را می‌توان با به کار بردن یک اپوکسید دو عاملی و یک عامل پخت چهار عاملی نشان داد (شکل ۶). اگر کار با مقادیر اضافی اپوکسید شروع شود و تا مقادیر اضافی از عامل پخت ادامه یابد، طیفی از محصولات به دست خواهد آمد.

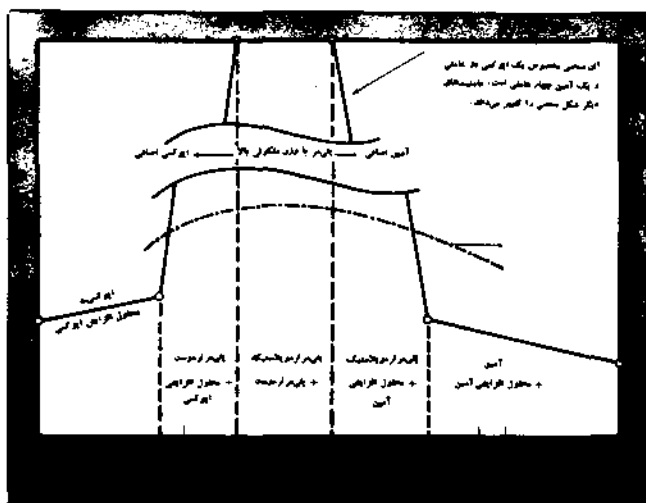
نسبت ترکیب یک سیستم آمین - اپوکسی بوسیله نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. همچنانکه غلظت آمین نسبت به اپوکسید کاهش می‌یابد، ترکیب سیستم پخت شده از آمین «خالص» تغییر می‌کند و به محصول افزایشی آمین - اپوکسی نزدیک می‌شود و سپس به یک پلی‌مر ترموست، یک پلی‌مر ترموپلاستیک و بالاخره به یک اپوکسی - آمین تبدیل می‌شود. بطور کلی، آندسته از خواص کارکردی که رزینهای اپوکسی را مشخص می‌کند، مانند دمای خم شدن و مقاومت در مقابل مواد شیمیایی و حلالها، در نقطه استوکیومتری یعنی نقطه‌ای که شبکه‌های سه بعدی نامحدودی تشکیل می‌شود، به بیشترین مقدار خود می‌رسد، همانطور که در شکل ۷ با خط - نقطه نشان داده شده است. خواص فیزیکی محصول در طرف راست نقطه‌ایکه شبکه نامحدود تشکیل می‌شود بطور معکوس تحت تأثیر محصول افزایشی با وزن مولکولی کم حاضر، قرار می‌گیرد. محصول افزایشی به عنوان یک ماده نرم‌کننده عمل می‌کند و افزایش غلظت آن نامطلوب شدن سریع خواص را در پی دارد. از طرف دیگر همچنانکه محصول به یک پلی‌مر ترموپلاستیک نزدیک می‌شود و حتی بعد از آن، به علت وزن

پخت کاتالیزوری زمان عملی طولانی در دمای اتاق و خواص الکتریکی خوب تا دمای ۱۷۰°C را می‌تواند تأمین کند.

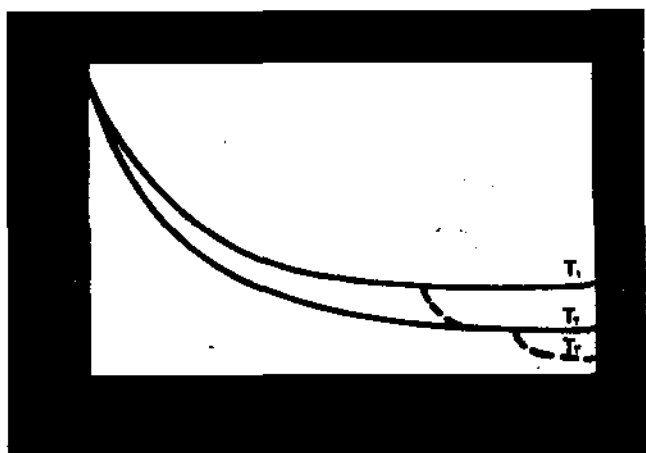
هم واکنش دهنده‌ها؛ طی سالیان متوالی، هم واکنش دهنده‌های بسیاری توسعه یافته‌اند و گزینش صحیح یکی از آنها از اهمیت بسیار با گزینش رزین مینا برخوردار است. اگر چه فهرستی که ارائه می‌شود کامل نیست، ولی معمولی‌ترین عوامل پخت را می‌توان به طریق زیر طبقه‌بندی کرد. پلی‌آمینهای آلیفاتیک و مشتقات آنها؛ این گروه موادی مانند اتیلن‌دی‌آمین، دی‌اتیلن‌تری‌آمین، تری‌اتیلن‌ترا آمین، تترا اتیلن پنتا آمین و چندین سیکلو آلیفاتیک دیگر را دربر می‌گیرد. این عوامل پخت طبقه‌ای، از عوامل پخت در دمای محیط و با ویسکوزیته کم را عرضه می‌کنند. در هر حال سروکار داشتن و آمینهای اصلاح نشده به دلیل قدرت بازی و فشار بخار آنها خطرناک است. ترکیبات کم خطرتر سیستمهای آمید و آمین و پلی‌آمید اسید چرب واکنش پذیر هستند که سبب پخت رزینهای اپوکسی در دمای اتاق می‌شوند و محصولاتی زبرتر و انعطاف پذیرتر به وجود می‌آورند. عوامل پخت در دمای اتاق می‌توانند در اثر ترکیب آمینهای آلیفاتیک به مقدار اضافی با مواد حاوی اپوکسی تشکیل شوند که در نتیجه آن وزن مولکولی آمین افزایش می‌یابد.

آمینهای آروماتیک: این گروه شامل موادی مانند ۴-۴ - متیلن‌دی‌آمین، متا - فنیلین‌دی‌آمین و ۴-۴ - دی‌آمینو دی‌فنیل سولفون، هستند. آمینهای آروماتیک واکنش پذیری کمتری نسبت به آمینهای آلیفاتیکی دارند و معمولاً دمای پخت بالاتر از ۱۴۹°C مورد نیاز است. بنابراین، این گروه سیستمهایی با دوام در دمای اتاق ارائه می‌دهند که در

عرضی. خواص رزین اپوکسی پخت شده را می توان آنقدر جفت و جور کرد تا به خصوصیات کارکردی ویژه دست یافت. این تنوع عامل اصلی سرعت رشد مداوم رزینهای اپوکسی طی سالیان متوالی بوده است



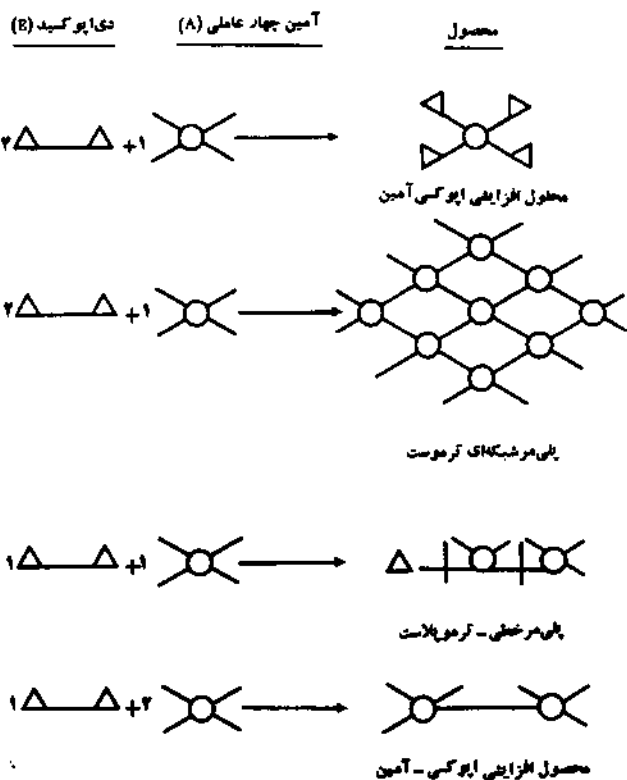
شکل ۷- ترکیب مخلوط اپوکسی - آمین. مول آمین / مول اپوکسی



شکل ۸- اثر زمان و دما بر روی درجه پخت یک سیستم رزین اپوکسید

علاوه بر تنوع فوق، رزینهای اپوکسی که به طور مناسب پخت شده اند خصوصیات دیگری را نیز در بر دارند:

- مقاومت شیمیائی بسیار خوب، به ویژه در مقابل محیط های قلیائی.
- چسبندگی بسیار خوب با سوبستراهای گوناگون.
- استحکام کششی، فشاری و خمشی بسیار بالا.
- درهم رفتگی بسیار کم به هنگام پخت.
- خواص عایق سازی الکتریکی بسیار خوب و مقاومت در مقابل فرسایش و قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی سخت.
- مقاومت قابل توجه در مقابل خوردگی.
- درجه مقاومت بالا در مقابل سوه کاربرد از نظر فیزیکی.



شکل ۶- نمایش چگونگی تشکیل شبکه

مولکولی بالاتر ترموپلاستیک در مقایسه با محصول افزایشی اپوکسی - آمین، اثر کمتری بر روی خواص مشاهده می شود. بحث مشابهی در مورد سایر انواع عوامل پخت نیز می توان عنوان کرد. وسعت واکنش به دست آمده بین رزین اپوکسی و عامل پخت، یا درجه پخت، به وسیله شرایط پخت و نوع واکنش دهنده ها تعیین می گردد. اگر دمای انتقال شیشه ای تقریباً برابر دمای پخت باشد، محتوای اپوکسی یک سیستم پخت به یک مقدار ثابت حداقل می رسد. اگر دمای رزین زیر دمای انتقال شیشه ای باشد، واکنش بعدی به علت تحرک کم زنجیرهای پلی مر بسیار آهسته است. اثر دمای پخت روی میزان واکنش در شکل ۸ نشان داده شده است. مثلاً سرعت ناپدید شدن و میزان واکنش با افزایش دما از T_1 تا T_2 ، افزایش می یابد، همچنین، گرما دادن سیستمی که به ترتیب در دماهای T_1 یا T_2 یا T_3 پخت شده است، میزان پخت را به آن اندازه افزایش می دهد که از پخت مقدماتی در دمای بالاتر به دست می آید، که در شکل ۸ با نقطه چین نشان داده شده است. بنابراین به منظور دستیابی به حداکثر پخت و خواص بهینه، سیستم باید در دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه ای خود پخت شود.

کاربردها:

رزینهای اپوکسی از آن جهت چنین کاربرد وسیعی یافته اند که با انتخاب مناسب رزین، اصلاح کننده و عامل تشکیل دهنده پیوندهای

علوم تکنولوژی سال اول - شماره دوم

— قابلیت پخت در گستره وسیعی از دما.

— استحکام خستگی عالی.

پوششهای سطحی: با وجود اینکه رزینهای اپوکسی از مواد صمغی مورد مصرف در پوششها کمی گرانترند، ولی این رزینهای اپوکسی در میان پرداختهای تزئینی و محافظت کننده بسیار موثر، که در آنها مقاومت شیمیایی و مقاومت در مقابل خوردگی و از طرفی چسبندگی بالایی مورد نیاز است، اهمیت تجاری پیدا کرده اند.

دو نوع پوشش اپوکسی وجود دارد: یکی از آنها در دمای محیط پخت می شود، و دیگری در اثر گرما پخت می شود. در پوششهای اپوکسی نوع اول از طریق حلقه اکسیران و به کار بردن پلی آمینها، محصولات آمین، پلی آمیدها، پلی مرکاپتانها و عوامل پخت کاتالیزوری، در آنها پیوند عرضی تشکیل می شود و در پوششهای رزین نوع دوم که در اثر گرما سخت می شوند، از طریق واکنش گروههای هیدروکسیل یا، در بعضی موارد، ترکیبی از عاملیت هیدروکسیل و اپوکسی، با استفاده از انیدریدها و پلی کربوسیلیک اسیدها و رزینهای ملایم فرمالدهید، اوره فرمالدهید و فنول فرمالدهید، پیوند عرضی در آنها به وجود می آید.

بیشتر مردم با پوششهای رزینی که در دمای محیط پخت می شوند یا نوع «دوقلو» که در فروشگاهها به فروش می رسند آشنا هستند. آنها اولین پوششهای پخت شونده در دمای اتاق بودند. این نوع پوششها در موارد زیر کاربرد وسیعی دارند: پوششهای صنعتی بادوام، پوششهای نگهدارنده وسایل دریایی، آسترهای تانک، کف پوشها، بتونههای هواپیما، پرداخت شخصی وسایل خانگی و وسایل کشاورزی و ساختمانی. همچنانکه از نام این پوششهای اپوکسی «دوقلو» مشخص است، آنها درست قبل از مصرف مخلوط می شوند و بعد از افزودن عامل پخت، زمان عمل محدودی دارند. زمان در سیستمهای تجاری بین چند ساعت تا یکی دو روز است که زمان عمل نمونه حدود ۸ تا ۱۲ ساعت است. معمولی ترین پوششهای دوقلو بر مبنای رزینهای اپوکسی با WPE بین ۱۸۰ و ۲۷۵ (جدول ۱) هستند که به وسیله آمینها، محصولات افزایشی آمین، و پلی آمیدها پخت می شوند. عوامل پخت پلی آمین و نوع محصولات افزایشی آمین، مقاومت شیمیایی کلی بهتری را تامین می کنند، اما پلی آمیدها انعطاف پذیری در مقابل آب فیلم و مقاومت بهتری را ارائه می دهند و در تهیه سطوح غیر متعارف، تا حدودی انعطاف پذیری بیشتری از خود نشان می دهند.

دو پوشش دیگر از نوع رزین اپوکسی وجود دارد که تحت عنوان پوششهای هوا خشک به جای پخت شونده در دمای محیط، طبقه بندی می شوند، زیرا آنها به عامل پخت احتیاج ندارند. اولین پوشش از این نوع، استرهای اپوکسی هستند. که رزینهای اپوکسی با وزن مولکولی بالاتری هستند و با اسیدهای چرب نوع خشک کننده با اشباع نشده مانند اسید کرچک بدون آب، استری می شوند. این نوع استرها معمولاً از رزینهای اپوکسی جامد که WPE آنها در گستره ۹۰۰ است تهیه می شوند و می توان آنها را پلی الهای خاص به حساب آورد. مانند تکنولوژی موسوم در رزین آلکید، این پوششها از استری شدن رزین با یک اسید چرب در دمای

۲۰۴ تا ۲۳۲ تولید می شوند. در آغاز اسید چرب با حلقه اکسیران در دمای پائین تر ترکیب می شود و یک «e-هیدروکسیل استر تشکیل می دهد. در پی آن این گروههای هیدروکسیل و آنهایی که قبلاً در رزین وجود داشتند با کمک استری شدن کاتالیزوری و حذف آنتوتروپی آب تشکیل شده، در دماهای بالاتر استری می شوند. این اپوکسی استرها، در پرداخت کف اتاقها و ورزشگاهها و پوششهای نگهدارنده و روغنهای پرداخت تزئین کننده فلزات به کار می روند، که در اثر اکسایش اسید چرب اشباع نشده، در هوا خشک می شوند، و به رنگهای معروف به «روغن پایه» شبیه هستند.

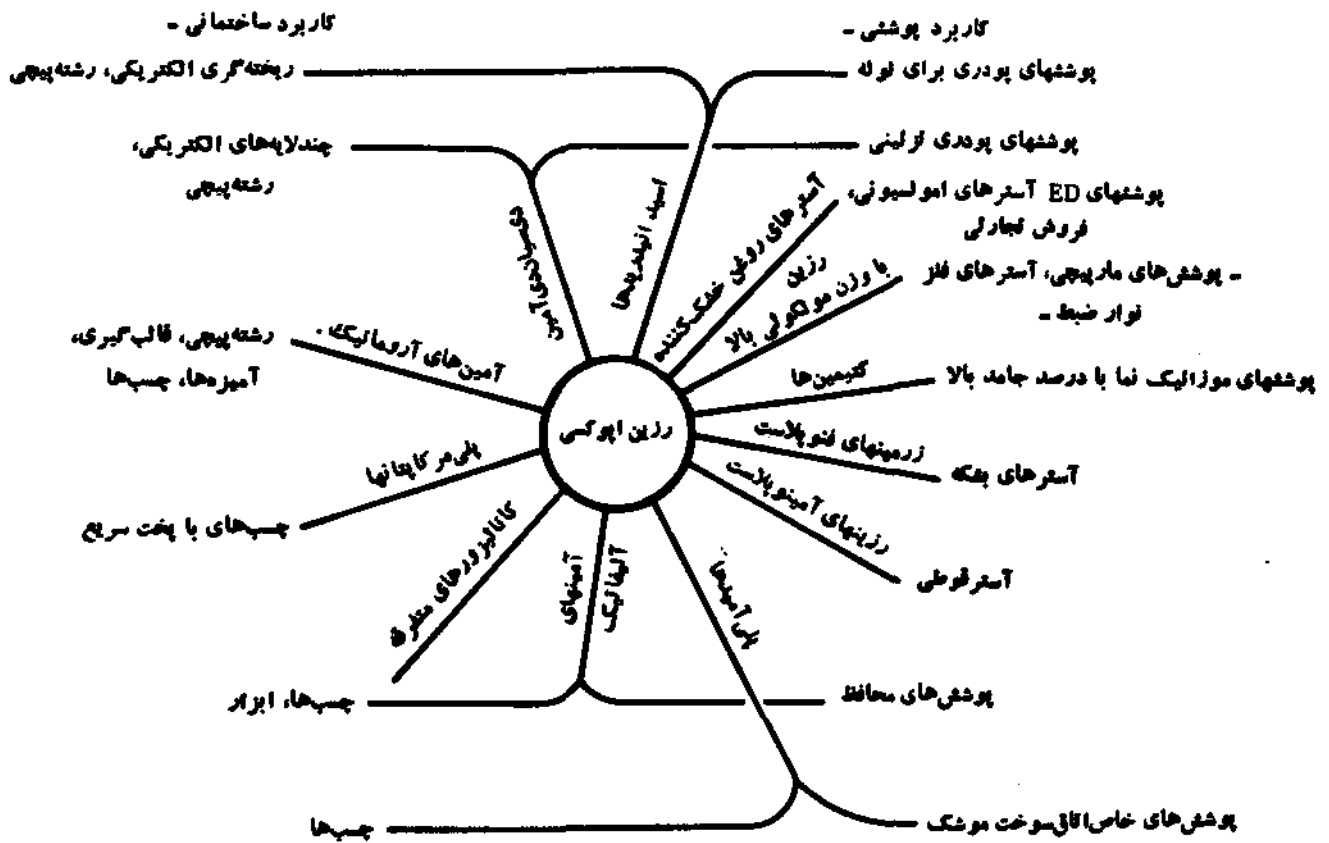
گروه جدیدتر روغنهای پرداخت مشتق از اپوکسیها بر اساس پلی هیدروکسی اترهای خطی با وزن مولکولی بسیار بالا که وزن مولکولی بیشتر از ۵۰۰۰۰ دارند، بنا شده اند. برخلاف سیستمی که در بالا توصیف شد، این پوششها معمولاً از طریق شیمیایی دارای پیوند عرضی نمی شوند، اما در اثر تبخیر حلال، فیلمهای ترموپلاستیک سختی را ایجاد می کنند. در هر حال گاهی با استفاده از مقادیر کمی از رزینهای آمینوپلاست، برای کاربردهای پختنی که توصیف آن خواهد آمد، دارای پیوند عرضی می شوند. پوششهایی از این نوع انعطاف پذیری بسیار زیاد با چسبندگی و مقاومت شیمیایی خوبی را ارائه می دهند و برای بتونههای پیش ساخته خشک شوند در هوا و آسترهای اتومبیل و پوشش ظروف پختنی به کار می روند.

رزینهای اپوکسی با وزن مولکولی بالاتر یعنی دارای WPE حدود ۱۷۵۰ یا بیشتر عموماً در ظروف پختنی استفاده می شوند. در این مورد غلظت گروههای اکسیران کم است، و پیوند عرضی اساساً به واسطه عاملیت های هیدروکسیل به وجود می آیند. رزینهای اپوکسی جامد با وزن مولکولی بالا با فنول فرمالدهید و رزینهای آمینوپلاست (رزینهای ملایم فرمالدهید و اوره فرمالدهید) به طور همزمان وارد واکنش می شوند و با از دست دادن آب یا الکل اتصالات مربوطه، تشکیل می شوند. این نوع رزینهای اپوکسی سالهاست که به عنوان پوششهای مقاوم در مقابل حلالهای قوی و مواد شیمیایی به کار می روند. سیستمهای تبدیل شده فنولی به عنوان پوشش قوطیهای کنسرو مواد آشامیدنی و غذایی، پوشش چلیکها و مخزنها، پوشش داخلی لولهها، پوشش سیمها و مواد جلا دهنده اشباع، به کار می روند. رزینهای آمینوپلاست اگر چه مانند پوششهای اپوکسی فنولی در مقابل مواد شیمیایی مقاوم نیستند، ولی به علت رنگ بهتر و دماهای پخت پائین تر کاربردهای خاص دارند. روغنهای پرداخت از نوع رزینهای اپوکسی — آمینوپلاست به عنوان پوشش قوطیهای کنسرو، آستر وسایل الکتریکی خانگی، پوشش شفاف برای سخت افزارهای برنجی، جواهر آلات، پلاستیکهایی که در خلاء با فلز پوشش شده اند، پوششهای ورقه ای، پوشش اسباب و لوازم بیمارستانی و آزمایشگاهی، به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند.

رزینها اپوکسی مورد مصرف در پوشش، در اثر واکنش با عوامل پخت، خواص عالی خود را به دست می آورند. در اثر واکنش عوامل پخت

نسبت به کاربردهای پوششی است. چهار کاربرد پایانی ساختمانی عمده برای سیستمهای رزین اپوکسی موجود است. که عبارتند از: ۱) پیوند دهنده‌ها و چسبها (۲) مواد ریخته‌گری و بودرهای قالب‌گیری و ابزارسازی (۳) کف‌پوش، سنگفرش، سیمانکاری و پلاستیکهای تقویت شده یا کامپوزیتها (چند لایه‌های الکتریکی و رشته‌پیچی). در این مورد هم به

با اپوکسیدها و عاملینهای هیدورکسیل رزینهای اپوکسی، فیلمهای بسیار مقاوم در مقابل مواد شیمیائی و حلالها نتیجه می‌شود، زیرا تمام پیوندها از نوع اتصالات نسبتاً پایدار کربن-کربن، کربن-اکسیژن (اتر) و کربن-نیتروژن (آمین) هستند. بسیاری از سیستمهای پوشش رزینهای اپوکسی متداولتر و کاربردهای پایانی آنها در شکل ۹ خلاصه شده است.



دلیل تنوع، رزینهای اپوکسی در زمینه‌های ساختمانی کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. این رزینها را می‌توان به صورت مایعات با ویسکوزیته کم، برای اشباع کردن و ریخته‌گری آسان اصلاح کرد و یا به ترکیبات جامد جهت آسان ورقه شدن یا قالب‌گیری تبدیل کرد. بسته به عامل پخت این رزینها می‌توانند در دمای اتاق به آهستگی (چند ساعت) یا به سرعت (چند دقیقه) پخت شوند و خواص متنوعی از مواد نرم انعطاف‌پذیر تا محصولات سخت، سفت و مقاوم در مقابل مواد شیمیایی تولید کنند.

پیوند دهنده‌ها و چسبها: چسبهای رزین اپوکسی اغلب به صورت دو جزئی مایع یا خمیر مصرف می‌شوند که در دمای اتاق یا بالاتر پخت می‌شوند. این نوع چسبها با یک پلی‌آمید یا پلی‌آمین پخت می‌گردند و در نوع دیگر آن که سریع پخت می‌شود، توسط یک پلی‌مرکاپتان کاتالیز شده و با یک آمین پخت می‌شوند. گرچه بخش عمده‌ای از چسبها از این نوع‌اند، ولی تعداد زیادی از چسبهای اپوکسی پیشرفته‌تر به صورت نوار تقویت شده عرضه می‌شوند، یعنی یا به صورت یک نوار شیشه‌ای اشباع شده با چسب بوده و یا به صورت نوار تقویت نشده هستند. سیستمهای

امروزه فشارهای محیطی و ملاحظات انرژی منجر به تغییرات سریعی در تکنولوژی پوششهای اپوکسی شده است. در حال حاضر عوامل پخت و رزینهای اپوکسی جدید، برای تولید جامدات بالاتر، پوششهای بدون حلال و حتی شناور در آب، در حال توسعه‌اند. پوششهای اپوکسی به صورت پودر مورد استفاده قرار می‌گیرند تا انتشار حلال کاملاً حذف شود، و یا اینکه آسترهای اپوکسی - آکریلیک حلال روی جامدات صددرد استعمال می‌شوند، که در اثر تشعشع نور UV پخت می‌شوند. تکنیکهایی جهت کاهش دمای پخت روغنهای پرداخت اپوکسیها که در اثر گرما پخت می‌شوند، توسعه یافته‌اند و استفاده از سیستمهای دو قلو برای کاربردهای پختی در دمای پائین ظاهراً افزایش یافته‌اند. در هر حال، مبنای شیمیائی تمام این واکنشها هنوز به طور عمده همان است که قبلاً بسط یسافت و توصیف آن در بالا آمد. پوششهای حاصل هنوز همان خواصی را حفظ کرده‌اند که اپوکسیها با آن شناخته می‌شوند.

کاربردهای ساختمانی: کاربردهای ساختمانی یا غیر پوششی رزینهای اپوکسی بسیار پراکنده‌تر است و خلاصه کردن آنها کار مشکلتری

یک قلو نیز وجود دارند. که شامل یک عامل پخت پنهان و رزین اپوکسی هستند. عوامل پخت پنهان مانند دی‌سیان‌دی‌آمین و نمکهای بُورن‌تری فلوئورید، مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا این عوامل، پس‌اندازی سیستمهای یک قلو و پخت سریع آنها در دمای بالا را تأمین می‌کنند. این سیستمهای چسب در صنایع هواپیما و اتومبیل برای جایگزینی بسیاری از بستهای مکانیکی و چسبهای اتومبیل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

ترکیبات قالب‌گیری، ریخته‌گری و ابزارسازی: رزینهای اپوکسی در صنایع الکتریکی و الکترونیک برای رزین‌ها ریخته‌گری، ترکیبات قالب‌گیری و رزینهای پخت‌شونده موقیبت برتری را داراست. خواص دی‌الکتریک ممتاز همراه با درهم رفتگی کم، به هنگام پخت و چسبندگی خوب، رزینها اپوکسی را مناسب برای این کاربردهای پایانی می‌سازد.

محصولات ریخته‌گری اپوکسی با ریختن مخلوط رزین و عامل پخت در قالب و پخت آن تا محصول نهایی و سپس جداسازی از قالب، حاصل می‌شوند. در سیستمهای پخت‌شونده قالب به عنوان قسمت مکملی از محصول نهایی باقی می‌ماند. برای این کاربردها رزینهای اپوکسی مایع که معمولاً در دماهای بالا با آمینهای آروماتیک و انیدریدها پخت می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد درهم رفتگی کمتر، زمان پخت طولانی‌تر و گرم‌زایی کمتر را به هنگام پخت فراهم می‌آورند.

ترکیبات قالب‌گیری بر مبنای رزینهای اپوکسی جامد با آمینهای آروماتیک یا انیدریدها پخت می‌شوند. این ترکیبات حاوی بارهای پُرکن زیادی هستند (بیشتر از ۵۰٪ حجمی) و به وسیله پرکننده کردن اجزاء در آسیاب دوغلتکی یا در محفظه گرمایی، ساخته می‌شوند. مخلوط حاصل سرد و سپس به اندازه ذرات مورد نظر سائیده می‌شود. در حال حاضر استفاده اصلی از ترکیبات قالب‌گیری اپوکسی در بسته‌بندی قطعات الکتریکی و واشرهای لوله و کاربردهای فضایی ویژه است.

کف پوشها، سنگفرشها و سیمانکارها: سیستمهای اپوکسی دو قلو به عنوان پیوند دهنده برای تعمیر چاله‌ها، سطوح ضد لغزش، سیمانکارها در معرض هوا و کف پوشهای موزائیک‌نمای نازک یکپارچه صنعتی به کار می‌رود. فرموله کردن نوعی بر مبنای یک رزین اپوکسی مایع حاوی یک رقیق‌کننده فعال یا غیر فعال، پُرکنها و عوامل غلیظ‌کننده ویژه می‌تواند باشد. و از آنجا که یک عامل پخت در دمای اتاق لازم است معمولاً عوامل پخت مانند آمینها یا پلی‌آمیدهای به کار برده می‌شوند.

اکنون موزائیکهای اپوکسی جایگزین کف پوشهای بتونی شده‌اند زیرا پخت اپوکسیها یک شبه انجام می‌شود و روز دیگر قابل استفاده است. ضخامت $\frac{1}{4}$ تا $\frac{3}{4}$ اینچ این موزائیکهای اپوکسی، وزن رضایت‌بخشی را فراهم می‌آورد. مقاومت شیمیایی ممتازی دارد و بر روی بسیاری از سطوح مختلف می‌توان آنرا به کار برد. در کف پوشهای صنعتی این نوع رزینها سطوح غیر لغزنده و غیر ساینده‌ای را برای کارخانه‌های لبنیاتی و سایر کارخانه‌های تولید مواد غذایی فراهم می‌کنند. کاربرد در حال رشد وابسته دیگر، استفاده از سیستمهای رزین اپوکسی به عنوان پیوند دهنده برای

پاسیوهای در معرض هوا، کف استخرهای شنا، پیاده‌روها و چسارچوب دیوارها است.

پلاستیکهای تقویت شده یا کامپوزیتها: بعد از پوششهای محافظتی پلاستیکهای تقویت شده به تنهایی بیشتر از همه بازار رزینهای اپوکسی را به خود اختصاص داده است (شکل ۱). بخش عمده این بازار، صنعت چند لایه‌هاست. در حالیکه کاربردهای رشته پیچی بزرگترین بخش بعدی را تشکیل می‌دهد. پلاستیکهای تقویت شده از نوع رزینهای اپوکسی، وزن کم، مقاومت گرمایی خوب، مقاومت خوردگی عالی و خاص مکانیکی و الکتریکی خوب از خود نشان می‌دهند (۱۸).

سیستمهای چند لایه اپوکسی با رزینهای مایع و جامد فرموله می‌شوند، و انتخاب سیستم بستگی به فرآیند ساخت و دمای پخت دارد. چند لایه‌ها با اشباع الیاف تقویت‌کننده مانند الیاف شیشه‌ای، پلی‌مرهای سنتزی یا الیاف گرافیتی با سیستم رزین اپوکسی مورد نظر، ساخته می‌شوند و سپس در قالب یا حدیده گرم شده، پخت می‌شوند. نوعاً رزین اپوکسی جامد و یک عامل پخت پنهان مانند دی‌سیان‌دی‌آمین یا محصول افزایش بوران‌تری فلوئورید آمین، برای فرموله کردن چند لایه‌های الکتریکی به کار می‌رود که در کامپوزیتها، ماشینهای اداری و وسایل الکترونیکی دیگر مورد استفاده دارد.

چشم‌انداز کاربردی رزینهای اپوکسی آنقدر وسیع است که بحث مختصری در چند زمینه و نوع اصلی سیستمهای رزین اپوکسی امکان‌پذیر شده است. همانطور که اشاره شد رزینهای اپوکسی گستره وسیعی از ترکیبات را شامل می‌شوند که خواص آنها ویژه ساختار شیمیایی آنهاست. تنوع رزینهای اپوکسی از نظر شیمیایی دلیل کاربردهای متنوع این ماده است. این تنوع همراه با مهارت شیمیدانان و مهندسان است که رشد مداوم رزینهای اپوکسی را ضمانت می‌کند.

پانویس‌ها:

- ۱- Odran
- ۲- Shechtel
- ۳- Shechtel and Wynstra
- ۴- Alkoxide ester
- ۵- Arnold
- ۶- Alvey
- ۷- Pittal
- ۸- Trimellitc
- ۹- Hexa-hydrophthalic
- ۱۰- Nadic methylanthrydrid
- ۱۱- Dimercaptan
- ۱۲- Dicyandiamide
- ۱۳- Dithyazide
- ۱۴- Goenamime

References

- [1] *Mod. Plast.* 1979, 56 (1).
 [2] Tanaka, Y.; Miha, T.F. In "Epoxy Resins, Chemistry and Technology"; C. A. May and Y. Tanaka, Eds.; Marcel Decker: New York, 1973. Ch. 3.
 [3] Shechter, L.; Wynstra, J., Kurkfy, R.P. *Ind. Eng. Chem.* 1956, 48 (1), 94.
 [4] O'Neill, L.A.; Cole, C.P.J. *Appl. Chem.* 1956, 6, 356.
 [5] Dannenberg, H. *SPE Trans.* 1963, 3, 78.
 [6] Smith, I.T. *Polymer* 1961, 2, 95.
 [7] Tanaka, Y.; Miha, T.F. In "Epoxy Resins, chemistry and Technology"; C. A. May and Y., Tanaka, Eds., Marcel Decker: New York, 1973, p. 135.
 [8] Shechter, L. Wynstra, J. *Ind. Eng. Chem.* 1956, 48 (1), 86.
 [9] Flach, W.; Hofmann, W.J. *Polym. Sci.* 1954, 23, 497.
 [10] Belg. Patent 828 841, May 8, 1974, Minnesota Mining Company.
 [11] Arnold, R. J. *Mod. Plast.* 1964, 41, 149.
 [12] Somerville, G.R.; Parry, H.L.J. *Paint Technol.* 1970, 42 (540), 42.
 [13] Alroy, F.B.J. *Appl. Polym. Sci.* 1969, 13, 1473.
 [14] Sow, P.N.; Weber, C.D. *J. Appl. Polym. Sci.* 1973, 17, 2415.
 [15] Narracott, E.S. *Brit. Plast.* 1953, 26, 120.
 [16] Newey, H.A. unpublished Shell data.
 [17] Plesch, P.H., Ed. "The Chemistry of Cationic Polymerization", Pergamon Press: Oxford; 1963.
 [18] Somerville, G.R.; Jones, P.D. *Appl. Polym. Sci.* 1975, P. 790.
 [19] Nylca, P.; Smuderland, E. "Modern Surface Coatings"; Interscience Publishers: 1965, Ch. 5.

- (1) curing agents
- (2) oxiran
- (3) functionality
- (4) polybasic acid
- (5) drying - type fatty acids
- (6) oil - based
- (7) structural applications
- (8) aggregates
- (9) filament winding
- (10) potting resins
- (11) two - roll mill
- (12) binder
- (13) antileak
- (14) coating
- (15) laminates
- (16) end use
- (17) impregnating
- (18) Primer
- (19) casting
- (20) molding
- (21) pot - life
- (22) structur
- (23) homopolymerization

ولزه نامه

- (1) عوامل پخت
- (2) اکسیران
- (3) عاملیت
- (4) اسید چند عاملی
- (5) اسیدهای چرب نوع خشک کننده
- (6) روغن پایه
- (7) کاربردهای ساختمانی
- (8) سیمانکاری
- (9) رشته پیچی
- (10) رزینهای پخته شونده
- (11) آسیاب دو غلطکی
- (12) پیوند دهنده
- (13) ضد لغزش
- (14) پوشش
- (15) چند لایهها
- (16) کاربرد پایانی (بایانه)
- (17) انبساط شدن
- (18) آستر
- (19) ریخته گری
- (20) قالب گیری
- (21) زمان عمل
- (22) ساختار
- (23) هوموپلیمر شدن