

پارامترهای مؤثر در انتخاب چسب مصرفی در صفحات ساندویچی و لانه زنبوری

The Study of The Parameters Affecting The Choice of Adhesive
in Sandwich Panels and Honeycombs

مهدی باریکانی، حسین امیدیان

مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی مواد پلیمری

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، صفحات ساندویچی، لانه زنبوری، چسب ساختاری

چکیده

در این مقاله، نقش چسب در کاربردهای ساختاری و پارامترهای مؤثر در انتخاب آن برای صفحات ساندویچی و لانه زنبوری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این راستا تمام پارامترهای مهم از نظر کاربرد و فراروش و تناسب چسبهای مختلف برای شرایط بهینه بررسی می‌شود. با توجه به موارد استفاده از چسبهای آلیاژی برای شرایط بهینه کاربرد و فراروش مناسبتر است. این نوع چسبها از دو فاز مختلف تشکیل می‌شوند که برای این منظور یک فاز لاستیکی و یک فاز گرماسخت مطلوب است. از آنجا که طیف وسیعی از ترکیب این دو فاز قابل دستیابی است، انواع این چسبها را می‌توان ساخت که ضمن اشاره به آنها درباره دو نوع چسب اپوکسی و فتولی در شکل خلاصه و الیاز شده با لاستیکها به تفصیل بحث می‌شود. براساس نتایج این بحث، استفاده از چسب تیشیل-فتولی به عنوان یک چسب مطلوب برای شرایط بهینه پیشنهاد می‌شود.

مقدمه

در کاربردهای مهندسی، چسبهایی موردنظرند که قابلیت انتقال تنشهای زیاد را داشته باشند. بدیهی است چسبهای حساس به فشار و طیف وسیعی از گرمانرها در این مقوله نمی‌گنجد. وظیفه اصلی چسب، اتصال قطعات به یکدیگر است. چسبها این وظیفه را از طریق انتقال تنش از یک عضو به عضو دیگر انجام می‌دهند و در مقایسه با روشهای متداول برقراری اتصال، توزیع یکنواخت‌تری از تنش فراهم می‌آورند. این نقش می‌تواند با صرف هزینه کمتر و استحکام قابل مقایسه در وزنی کمتر توسط چسب اجرا شود. به عنوان مثال، در اتصالات مکانیکی یا جوشکاری، استحکام سازه محدود به سطح جوش خورده یا پیچ شده می‌شود.

متداولترین روشهای برقراری اتصال ساختاری، جوش معمولی (welding) و جوش زرد (brazing) است. این روش گران و مستلزم استفاده از دمای بالاست. برای مواد سبکی نظیر آلومینیم، منیزیم و تیتان که به‌وفور در ساخت صفحات ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرند، جوشکاری

مقدور نیست، چون گرمای بالا باعث تخریب فلز می‌شود. سوراخهای لازم برای پیچ‌کاری یا برقراری دیگر اتصالات مکانیکی در چسب‌کاری موردنیاز نیست، به همین علت توزیع تنش به شکل یکنواخت انجام می‌شود. توزیع تنش و چقرمگی ذاتی ویژه چسب، مقاومت خستگی به‌مراتب بالاتری را عرضه می‌دارد. در صورتی که اتصال به‌خوبی برقرار شود، سطوح چسب خورده معمولاً پیش از چسب زیر بار خستگی تخریب می‌شوند. از آنجا که چسبها با مدولهای مختلف طراحی می‌شوند، فرکانس تشدید (رزونانس) مخرب را می‌توان تعدیل یا حتی حذف کرد. در صنایع هوافضا به‌شکل گسترده‌ای از چسب استفاده می‌شود که ساخت صفحات ساندویچی نیز در این مقوله جای دارد. به عنوان مثال، اتصال لانه زنبوری به رویه‌های نازک فلزی بدون چسب امکان‌پذیر نیست. قابلیت نارسائایی و رسانایی الکتریکی و گرمایی چسبها را می‌توان به‌ترتیب با پف دادن و افزودن پرکننده‌های فلزی بالا برد. در کنار مزایای یاد شده، اندازه تنش و عوامل محیطی مثل دما، رطوبت، نمک یا حضور بخارات و مایعات آلی محدودیت ایجاد می‌کنند [1,2].

پارامترهای مؤثر در انتخاب چسب

به‌طور کلی مزایا و معایب چسبها را می‌توان به‌شکل زیر عنوان کرد [1]:

مزایا

- توزیع یکنواخت تنش و ایجاد سطح وسیعتر انتقال تنش
- اتصال مواد با هر شکل و ضخامت
- جلوگیری از خوردگی الکروشیمیایی بین مواد مختلف
- مقاومت در برابر بارهای خستگی و دوره‌ای
- نارسائایی گرما و الکتریسیته

Key Words: Composite, sandwich panels, honeycomb, adhesive, structural

- پایین بودن دمای پخت
- میراکننده ارتعاش و ضربه
- بالا بودن نسبت استحکام به وزن
- هزینه کم و سهولت اجرا

می‌کند و سطح اتصالی با بهترین خواص و مقاومت دو برابر شکست به وجود می‌آورد. هر جا که ممکن باشد باید عمده بار از طریق بارگذاری برشی انتقال یابد.

- کششی: استحکام اتصالات بارگذاری شده به طریق کششی یا برشی تقریباً قابل مقایسه است. همانند تنشهای برشی، توزیع تنش یکخواخت می‌باشد ولی با اطمینان کامل نمی‌توان گفت که همزمان تنشهای دیگری بر روی سطح عمل نمی‌کنند.

- پوستگی (peeling): یک یا هر دو سطح چسب خورده در این حالت انعطاف‌پذیرند. در این مورد تنش بسیار زیادی به خط مرزی اتصال وارد می‌شود و بجز حالتی که میزان بار ناچیز یا طول خط اتصال بزرگ باشد، شکست خیلی سریع اتفاق می‌افتد. تا حد امکان از این نوع بارگذاری باید پرهیز شود.

- گسستگی: این نوع تنش تا حدی مشابه با تنش پوستگی است و هنگامی روی می‌دهد که نیروهای وارد شده به یک انتهای مجموعه چسب خورده، دو سطح را از هم جدا سازند. این نوع تنش، ایجاد گسستاور می‌کند. در این حالت، تنش یکخواخت توزیع نشده و در یک طرف اتصال تمرکز می‌یابد، برای مقابله با این نوع تنشها، سطح وسیعی لازم است که پرهزینه خواهد بود.

لانه زنبوری در یک صفحه ساندویچی به عنوان عامل انتقال تنش عمل می‌کند. به همین دلیل شناخت تنشهای اعمال شده بر آن ضروری است. به طور مسلم، توزیع تنشها کمپلکس است، ولی دو حالت حدی را می‌توان تمیز داد. پس از ساختن بلوک (block) لانه زنبوری، فرایند انبساط روی آن اعمال می‌شود و در نتیجه آن خطوط چسب زیر تنشهای مختلف قرار خواهند گرفت. تنشها به طور عمده به دو شکل پوستگی و برشی ظاهر می‌شوند. شکل ۲ به روشنی پدیدار شدن تنشهای پوستگی در خط چسب را نشان می‌دهد.

- معایب
- عدم امکان آزمون سطح به طریق بصری
- لزوم آماده‌سازی دقیق سطح برای برقراری اتصال پایا
- زمان پخت طولانی در دمای پایین
- نیاز به پرس - آون و اتوکلاو
- محدودیت تحمل حداکثر دمای کاربرد تا 371°C
- لزوم کنترل شدید فرایند به ویژه در ارتباط با تمیزی سطح
- وابستگی عمر مفید اتصال به محیط کاربرد
- استفاده از حلال

پارامترهای مؤثر بر انتخاب چسب را می‌توان به موارد زیر تقسیم کرد [1,2]:

- نیازهای کاربرد نوع تنش (کششی، فشاری، برشی، ضربه، گسستگی (cleavage) و خستگی)، عوامل شیمیایی خارجی (اثر عوامل شیمیایی مثل حلالها، اسید و قلیا) و عوامل شیمیایی داخلی (اثر سطح چسب خورده روی چسب یا اثر چسب روی سطح).

- عوامل محیطی: آب و هوا، نور، رطوبت، نمک، محدوده دمایی و میکروارگانیسمها.

- نیازهای خاص: رسانایی گرمایی یا الکتریکی و نارسانایی گرما و الکتریسیته.

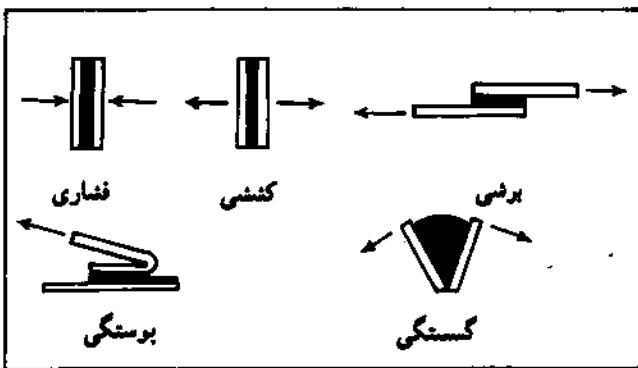
- نیاز تولید روش اعمال چسب، شرایط پخت (زمان و دما)، عمر نگهداری (shelf life)، عمر کاری (pot life).

- قیمت.
- ایمنی.

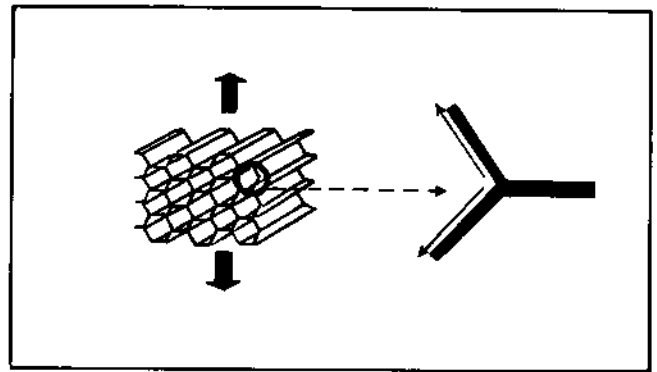
انواع تنشهایی که به یک اتصال وارد می‌شوند (شکل ۱) عبارتند از:

- فشاری: در صورتی که تنها تنش فشاری اعمال شود، احتمال شکست چسب حداقل خواهد بود، ولی این نوع بارگذاری معمولاً محدود است.

- برشی: این نوع بارگذاری، تنش یکخواختی را در سطح اتصال برقرار



شکل ۱ - انواع تنشهای موجود در یک اتصال [2].



شکل ۲ - وقوع تنش پوستگی در خط چسب لانه زنبوری.

نکته به جاست که عوامل پخت مصرفی در ساخت چسبهای اپوکسی از قابلیت‌های متنوعی برخوردارند، به طوری که می‌توان از هر کدام در ترکیب با اپوکسی، خواص متفاوتی به دست آورد. از این میان می‌توان به چسبهای اپوکسی - آمین، اپوکسی - انیدرید، اپوکسی - پلی آمید و اپوکسی - فنولی اشاره کرد.

از مهمترین عوامل محیطی مؤثر در انتخاب چسب می‌توان دمای بالا، دمای پایین و سرمازایی (cryogenic)، رطوبت، مواد شیمیایی و حلالها، خلأ، تابش و میکروارگانیسمها را نام برد.

دمای بالا

تمام پلیمرها در دماهای بالا، تا حدی تخریب می‌شوند. خصوصیات موردنیاز چسب در دمای بالا، نقطه ذوب یا نرم شدن بالا و مقاومت اکسایشی است. چسبهای گرماترم در دمای اتاق اتصال عالی برقرار می‌کنند ولی، وقتی دمای کاربرد به دمای انتقال شیشه‌ای برسد، جریان پلاستیک باعث تغییر شکل می‌یوند و کاهش استحکام همجسمی خواهد شد. چسبهای گرماسخت نقطه ذوب ندارند و شبکه عظیمی از درشت مولکولها هستند. عامل بحرانی در گرماسختها، سرعت کاهش استحکام در اثر اکسایش گرمایی و پیرولیز است. چسبهای مقاوم در دمای بالا معمولاً از ساختار سخت پلیمری، دمای نرم شدن بالا و گروههای پایدار شیمیایی برخوردارند. همه این عوامل، فرایند چسبیدن را مشکل می‌سازد. تنها معدودی از چسبها، دمای بالاتر از 117°C را به مدت طولانی تحمل می‌کنند.

چسبهای فیلمی و نواری (tape) در مقایسه با چسبهای خمیری، رفتار کاملاً متفاوتی نشان می‌دهند. ویژگی آنها این است که حاوی درصد بالایی از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا می‌باشند. به عبارت دیگر، در چسبهای مایع و خمیری از رزینهای با وزن مولکولی پایین و در فیلم و نوار از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا (حدود ۲۰۰۰۰۰) استفاده می‌شود. شبکه‌های ساخته شده از این نوع پلیمرهای خطی سنگین، به مراتب چقرمه‌ترند و ازدیاد طول برگشت پذیرتری را در مقایسه با شبکه‌های ساخته شده از رزینهای سبک نشان می‌دهند.

چسبهای اپوکسی به دمای کاربرد پایتتر از 121°C محدود می‌شوند. بعضی از ترکیبات اپوکسی، دمای 260°C را در کوتاه مدت و دمای 149°C را در بلندمدت تحمل می‌کنند. در حالت اخیر، اپوکسی با یک عامل پخت دما بالا یا به شکل آلیاز فرمولبندی می‌شود. در این خصوص مهمترین آلیاز اپوکسی با رزینهای فنولی است. پایداری گرمایی قابل توجه رزینهای فنولی همراه با خواص عالی چسبندگی امکان مجاورت کوتاه مدت در 371°C و بلندمدت در 177°C را می‌دهد.

عوامل پخت انیدریدی، خواص پایداری گرمایی بهتری در مقایسه با سایر عوامل پخت اپوکسی به دست می‌دهند. فتالیک انیدرید، پیروملیتیک انیدرید و کلروانیدیک انیدرید، چگالی شبکه را بالاتر برده و

تنشهای برشی به طور عمده موقع بریدن بلوکها به ضخامت موردنظر یا انحنای مشخص، ظاهر می‌شوند. از آنجا که تمام مقدار تنش اعمال شده در دو حالت پوستگی و برشی باید توسط خط چسب منتقل شود، دسترسی به مقدار بهینه‌ای از این دو تنش الزامی است. قابل توجه است که بر اساس تجربه، اهمیت بهینه‌سازی چسب مصرفی در اتصال رویه و مغزه به مراتب از این مورد بیشتر است.

وقتی مصارف غیرساختاری لانه زنبوری موردنظر باشد، اهمیت این بهینه‌سازی چندان نخواهد بود. دلیل آن کاملاً روشن است: مصرف غیرساختاری لانه زنبوری استفاده از چسب غیرساختاری را دیکته می‌کند و در این حالت تنها چسبندگی موضعی بدون تحمل تنش و انتقال آن، وجود خواهد داشت. اهمیت بهینه‌سازی به طور عمده در کاربردهای ساختاری لانه زنبوری آشکار می‌شود که در این حالت، چسب ساختاری مصرف می‌شود. علت بهینه‌سازی آن است که تنشهای برشی و پوستگی به جهت ماهیت متفاوت، عکس یکدیگر عمل می‌کنند. خط چسب انحطاط پذیر به علت استحکام برشی کمتر در مقایسه با استحکام کششی وقتی در معرض تنشهای کششی قرار گیرد، طبعاً از راه مکانیسم برشی خواهد شکست. برعکس خط چسب سخت به سبب دارا بودن استحکام برشی بیشتر در قیاس با استحکام کششی وقتی متحمل تنشهای کششی شود، از طریق مکانیسم کشش می‌شکند. بدین ترتیب خط چسب انحطاط پذیر در برابر تنشهای پوستگی و خط چسب سخت در مقابل تنشهای برشی مقاوم خواهد بود. در این مرحله، استفاده از یک پایه لاستیکی یا گرماترم برای استحکام پوستگی بالا و یک پایه رزین گرماسخت به منظور دسترسی به استحکام برشی بالا موردنظر است. به عنوان پایه لاستیکی یا گرماترم می‌توان پلی کلروپرن، نیتریل و پلی وینیل استال را نام برد و برای دسترسی به خواص گرماسختها می‌توان رزینهای فنولی و اپوکسی را انتخاب کرد. بدین ترتیب، در ارتباط با تنشهای مکانیکی یاد شده می‌توان آلیازهایی تحت عنوانهای اپوکسی - نیتریل، اپوکسی - پلی کلروپرن، فنولی - نیتریل، فنولی - پلی کلروپرن، فنولی - وینیل و در موارد خیلی خاص آلیازهای سه تایی اپوکسی - لاستیک - فنولی را سنتز کرد. اشاره به این

مقاومت کوتاه مدت در 232°C را باعث می‌شوند و در بلندمدت نیز در دمای 149°C قابل استفاده‌اند. امتیاز سیستمهای چسب اپوکسی پایه، دمای پایین پخت، عدم ایجاد مواد فرار در طول پخت، هزینه کم و تنوع فرمولبندی و کاربرد است.

از میان چسبهای اصلاح شده فنولی، بهترین مقاومت گرمایی را نیتریل - فنولی داراست. این آلیاژ تا 177°C از استحکام برشی بالایی برخوردار بوده و در این دما، حفظ استحکام آن بسیار مطلوب است. چسب نیتریل - فنولی بسیار چقرمه بوده و از استحکام پوستگی بالایی برخوردار است.

چسب سیلیکون از پایداری گرمایی خوب ولی استحکام کم برخوردار است. کاربرد آن به‌طور عمده در مصارف غیر ساختاری است. مشکل اصلی در ساخت آلیاژ سیلیکون با فنولی یا اپوکسی، زمان پخت طولانی آن است. حداکثر دمای کاربرد در بلندمدت، 260°C و در کوتاه مدت، 316°C است.

رزینهای پلی آروماتیک مثل پلی ایسید و پلی بنزایمیدازول، از مقاومت گرمایی بالاتری در مقایسه با سایر چسبهای تجارتي برخوردارند. ساختار سخت آروماتیکی، دلیل انرژی زیاد تفکیک پیوند در این پلیمرهاست. حفظ استحکام چسبهای پلی ایسید در کوتاه مدت در دمای 538°C قدری بهتر از آلیاژ اپوکسی - فنولی است. مقاومت گرمایی این چسب در دماهای بالاتر از 260°C بی نظیر است. این نوع چسب معمولاً به‌شکل فیلم تقویت شده با الیاف شیشه و عمر نگهداری کم تولید می‌شود. در طی پخت (۹۰ دقیقه در 300°C) مواد فرار با نقطه جوش بالا آزاد شده که سبب تخلخل لایه چسب می‌شود. به‌علت سختی ذاتی ساختار، استحکام پوستگی این پلیمر بسیار کم است.

خواص پلی بنزایمیدازول نیز مشابه با پلی ایسید است، ولی خیلی سریع اکسید می‌شود و برای مجاورت بلندمدت در دماهای بالاتر از 232°C توصیه نمی‌شود. استفاده از دو چسب اخیر به علت استحکام پوستگی بسیار پایین، هزینه بالا و عدم دسترسی مستقیم به آن مطلوب به نظر نمی‌رسد.

دمای پایین و سرمازایی

در دمای پایین، چسبهای انعطاف‌پذیر، تمرکز تنش را به راحتی از طریق تغییر شکل دفع می‌کنند. در دماهای سرمازایی، مدول کشسانی به نقطه‌ای می‌رسد که این امکان از آنها سلب می‌شود زیرا با کاهش دما، مدول کشسانی به شدت افزایش می‌یابد. در چنین کاربردهایی، سیلیکون و پلی یورتان از همه مهمترند. رزینهای اصلاح نشده اپوکسی به علت مقاومت در برابر ضربه و پوستگی پایین در این دماها مناسب نیستند. اپوکسی - فنولی از استحکام عالی در این محدوده دمایی برخوردار است. در این دماها از آلیاژ اپوکسی - نایلون (به علت انعطاف‌پذیری نایلون) نیز می‌توان استفاده کرد. اپوکسی - پلی آمیدها هم به سادگی مخلوط شده و به راحتی

قابل اجرا می‌باشند و ضمن دارا بودن عمر بالای کاری، در دمای اتاق پخت می‌شوند. عملکرد چسب اخیر در دمای پایین، به خوبی چسب اپوکسی - نایلون نیست. آلیاژهای فنولی - وینیل و فنولی - نیتریل در دماهای پایین از استحکام مطلوبی برخوردارند.

رطوبت و آب

آب در چسب نفوذ می‌کند و در سطح مشترک اتصال قرار می‌گیرد. سرعت هیدرولیز به ساختار شیمیایی چسب، نوع و مقدار کاتالیزور مصرفی و همچنین انعطاف‌پذیری چسب بستگی دارد. برخی پیوندهای شیمیایی مثل استر، یورتان، آمید و اوره هیدرولیز می‌شوند. سرعت این واکنش برای پیوندهای استری بیشتر از همه است. چنین پیوندهایی در انواع چسبهای یورتان و اپوکسیهای پخت شده یا انیدریدها موجود است. در اغلب موارد، اپوکسی پخت شده با آمین در مقایسه با اپوکسی - انیدرید از خواص هیدرولیکی بهتری برخوردار است. در صورت مصرف مقادیر استوکیومتری کاتالیزور، خواص هیدرولیکی در مطلوبترین حالت خواهد بود. هیدرولیز در مواد انعطاف‌پذیر به سبب سهولت نفوذ آب شدیدتر عمل می‌کند. این پدیده به‌طور عمده در دمای بالا اثر می‌کند. بخار آب به خط اتصال نفوذ کرده و در سطح مشترک تولید یک لایه ضعیف مرزی می‌کند. این اثر به شدت به نوع چسب وابسته است. در چسبهای نیتریل - فنولی این پدیده مشاهده نمی‌شود. در چسبهای اپوکسی - نایلون هم تضعیف شدید خواص مانع از مصرف این چسبها در محیطهای مرطوب می‌شود. قابل توجه است که اثرات محیطی بر اتصالات چسب با حضور تنش، تسریع می‌گردد. در چنین کاربردهایی آلیاژ نیتریل - فنولی مطلوبتر از همه است.

مواد شیمیایی و حلالها

اپوکسیها نسبت به سایر چسبها، در برابر طیف وسیعی از حلالها و مواد شیمیایی بیشترین مقاومت را دارند. با وجود این، مقاومت در یک محیط خاص شیمیایی به نوع عامل پخت مصرفی به شدت وابسته است. آمینهای آروماتیک مانند متاقیلین دی آمین به ندرت مصرف می‌شوند. چسبهای یورتان نیز در مقابل مواد شیمیایی و حلالها، روغنها و چربیها مقاومت خوبی نشان می‌دهند. پدیدهی است که به چسب به‌نیه‌ای برای تمامی محیطهای شیمیایی نمی‌توان دست یافت، زیرا مثلاً مقاومت بالا در برابر اسیدها به معنای مقاومت پایین در مقابل بازهاست. ولی، به عنوان یک قاعده کلی، چسبهای مقاوم گرمایی از بیشترین مقاومت در برابر مواد شیمیایی و حلالها برخوردارند. با افزایش دما، اثر تخریبی مواد شیمیایی و حلالها بر اتصال بیشتر می‌شود.

خلا

درجه تبخیر چسب تابعی از فشار بخار آن در یک دمای مشخص است. از

دست رفتن اجزای سبک مانند نرم کننده ها، باعث سختی و تخلخل چسب می شود. اغلب چسبهای ساختاری از پلیمرهای سنگین ساخته می شوند و به همین دلیل فشارهای کم تا حد 10^{-4} Torr را به راحتی تحمل می کنند. دماهای بالا، تابش هسته ای و سایر عوامل مخرب محیطی ممکن است تشکیل اجزای سبک و در نهایت تبخیر چسب را در خلأ باعث شوند. پلیمر شدن ناقص که نتیجه فرایندهای ضعیف و عدم کنترل کیفیت سیستمهای ساخت است، باعث حضور اجزای سبک و در نهایت تبخیر مواد پلیمری می شود. در غیر این صورت، پلیمر در خلأ تبخیر نمی شود. تبخیر مواد پلیمری به معنای تجزیه ناشی از شکست زنجیرهای بلند پلیمر به زنجیرهای کوتاهتر است. طول زنجیر، میزان شاخه ها و درجه پخت عوامل مستقیم مؤثر بر سرعت تجزیه اند. نایلون، پلی سولفید و پلی کلروپرن در چنین محیطهایی به سبب سرعت بسالای تجزیه، مناسب نمی باشند.

کاربردی، چسب خاصی را باید طراحی کرد، ولی آنچه مسلم است هر کاربردی مجموعه ای از تشها و عوامل محیطی را بر روی خط چسب تحمیل می کند و بهینه ای از همه عوامل مورد نیاز است. با توجه به قابل دسترس بودن مواد، هزینه، پارامترهای یاد شده و شرایط محیط کاربرد لانه زنبوری، انتخاب محدود به چسبهای اپوکسی (اپوکسی - آمین، اپوکسی - انیدرید، اپوکسی - فنولی، اپوکسی - نیتریل، اپوکسی - پلی کلروپرن)، چسبهای فنولی (نیتریل - فنولی، پلی کلروپرن-فنولی، وینیل - فنولی) و سرانجام پلی یورتان (در شکل خالص یا آلیاز با رزینهای نظیر اپوکسی) می شود. در جدول ۱، عملکرد چسبهای یاد شده در کاربردهای مختلف مقایسه شده است. اشاره می شود که به دلیل خواص مطلوب چسبهای اپوکسی و فنولی، در این مقاله تنها این دو چسب مورد بررسی قرار می گیرند.

جدول ۱ - مقایسه رفتار چسبهای ساختاری در محیطهای مختلف [1].

نوع چسب	معمول کاربرد						
	پلی یورتان	کلروپرن - فنولی	وینیل - فنولی	نیتریل - فنولی	اپوکسی - فنولی	اپوکسی - انیدرید	اپوکسی - آمین
آروماتیکها	۱	۱	۱	۱	۵	۵	۶
استرها	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کتونها	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱
الکها	۵	۲	۳	۵	۵	۵	۶
سوخنها	۵	۵	۵	۵	۲	۵	۲
قلیها	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
اسیدها	۴	۲	۳	۵	۵	۵	۵
آب داغ	۴	-	۴	۵	۲	۵	۵
آب	۵	۵	۵	۵	۲	۵	۵
سرما	۵	۵	۴	۲	۳	۲	۲
گرما	۲	۲	۲	۵	۶	۶	۲
خواص پوستگی	۲	۲	۲	۵	۱	۲	۵
خواص برسی	۵	۵	۵	۵	۶	۵	۵

۱ - بسیار ضعیف ۲ - ضعیف ۳ - نسبتاً خوب ۴ - خوب ۵ - بسیار خوب ۶ - عالی

چسبهای اپوکسی

چسبهای اپوکسی که به ابر چسب (Super glue) نیز معروف اند، طیف وسیعی از مواد را بدون اعمال گرما یا فشار می چسبانند. اپوکسیدها در اشکال بسیار متنوع موجودند. برخی در دمای اتاق و بعضی در اثر گرما پخت می شوند. در میان چسبهای اپوکسی، سیستمهای دو جزئی خمیر یا

تابش

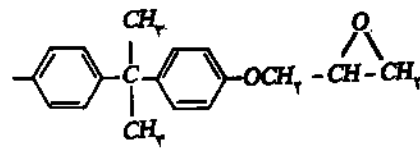
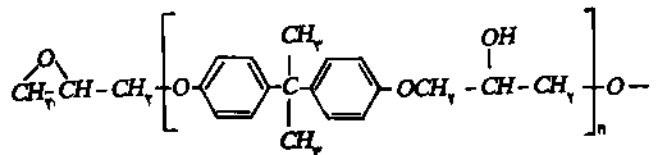
ذرات پراثری، تابش الکترو مغناطیس شامل تابش گاما، الکترون و نوترون بر روی چسبهای آلی اثر مشابهی دارند. تابش منجر به شکست زنجیرهای پلیمر در چسبهای ساختاری می شود که نتیجه آن شکنندگی و تضعیف اتصال خواهد بود. در دمای بالا، این اثر تشدید می شود. به عنوان یک قاعده کلی، چسبهای مقاوم گرمایی در برابر تابش هم مقاومت بیشتری نسبت به سیستمهای ناپایدارتر گرمایی نشان می دهند. مواد تقویتی لینی، پرکننده ها، عوامل پخت و دیگر افزودنیها بر مقاومت تابشی سیستمهای چسب مؤثرند. در مورد چسبهای اپوکسی، عوامل پخت آروماتیک نسبت به آلیفاتیک مقاومت تابشی بیشتری ایجاد می کنند. از میان چسبهای ساختاری، پلی سولفون، فنولی - اپوکسی، پلی استر غیر اشباع، پلی ایمید و پلی یورتان (تا حد ۱۰۰۰ مگاراد) از همه مطلوبترند. چسبهای نیتریل - فنولی نسبت به اپوکسی از مقاومت تابشی بیشتری برخوردارند. از میان خواص چسب، استحکام پوستگی سریعتر از سایر خواص در معرض تابش تضعیف می شود. در این حالت، ضخامت بالای لایه چسب بهتر عمل می کند. وقتی تابش، عامل اصلی در انتخاب چسب باشد، ضخامت ۰/۲۵ mm به عنوان حداقل ضخامت لایه چسب توصیه می شود. قابل توجه است که درجات پایین تابش تا حد ۳۰۰ مگاراد باعث افزایش چگالی شبکه در چسبهای نیتریل - فنولی می شود و بعد از ۵۰۰ مگاراد تخریب چسب آغاز می گردد.

میکروارگانسیمها

تخریب چسب توسط میکروارگانسیمها نیز ممکن است. در این مورد، پلی یورتانهای ساخته شده از پلی آل پلی استر از مقاومت نسبتاً بالایی برخوردارند، در حالی که نوع پلی استری بسیار مستعد تخریب است [1,2]. با توجه به موارد یاد شده می توان در ساقته کسه برای هر نیاز

مایع از همه متداولترند، در ضمن، دسته کوچکی از این مواد، تک جزئی بوده و بدون استفاده از گرما پخت می‌شوند. بعضی چسبها نیز به شکل فیلم، پودر، دانه یا نوارهای از پیش آغشته موجودند. از آنجا که هر نوع اپوکسی ویژه طیف خاصی از کاربرد است، موفقیت استفاده از اپوکسی به طور عمده به انتخاب نوع مناسب آن برای کاربرد مورد نظر بستگی دارد. استفاده بسیار گسترده از اپوکسی نه تنها به علت کارایی بالای آن است، بلکه مواردی نظیر سهولت کاربرد و موجود بودن آن در طیف وسیعی از خواص فیزیکی، انتخاب آن را برای کاربردهای متنوع و جدید مطلوب می‌سازد [3].

مهمترین نوع رزینهای اپوکسی، رزینهای بیس - اپی (Bis-epi) است که از واکنش بیس فنول A و اپی کلروهیدرین در حضور سود سوزآور به دست می‌آیند. فرمول ایده آل اپوکسی به صورت کلی زیر است که دو گروه انتهایی اپوکسی دارد. در عمل واکنشهای جانبی دخالت دارند



و رزینهای تجارتي به طور متوسط در هر مولکول از ۱/۰ تا ۱/۳ گروه اپوکسید برخوردارند. رزینهای تجارتي در اساس مخلوطی از پلیمرها می‌باشند که مقدار متوسط n در آنها از «۰» تا «۲۰» تغییر می‌کند. رزینهایی که مقدار متوسط n در آنها ۲ یا بیشتر باشد، در دمای اتاق جامدند. بیشترین توجه روی رزینهای مایع متمرکز است. هر مولکول پلیمر دارای n گروه هیدروکسیل است که سرعت پخت با عوامل آمینی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، چسبندگی اپوکسی پخت شده به فلزات و مواد قطبی از این راه افزایش می‌یابد. در نتیجه، اپوکسیهای مایع با گرانیوی بیشتر در چسب کاری ترجیح داده می‌شوند. گروههای هیدروکسیل، مسئول واکنش بسا ایندیدها نیز می‌باشند. به طبع رزینهای جامد از تعداد هیدروکسیل بیشتری برخوردارند و مقاومت گرمایی بالاتر و بهتری به دست می‌دهند. ولی، این مواد باید ابتدا حل شوند و حلال مصرفی پیش از اتمام واکنش پخت از سیستم خارج گردد. این کار خالی از زحمت نیست و در نتیجه کاربرد آنها به چسبهای فیلمی محدود می‌شود. این دسته از چسبها، به علت یکواختی ضخامت فیلم و وزن مولکولی بالا می‌توانند بیشترین مصرف را به عنوان چسب رویه به مغزه در صفحات ساندویچی داشته باشند. روشن است که برای چسب ورقه‌های لانه زنبوری، استفاده از اپوکسی مایع

مناسب است. ولی، به دلیل عمر کاری و عمر نگهداری کوتاه و مسئله گرمایی پخت که به شدت تابع جرم می‌باشد، استفاده از این دسته به عنوان چسب ورقه‌های لانه زنبوری پیشنهاد نمی‌شود. در صورت کاربرد باید قبل از اختلاط با عامل پخت، در سیستم سود ذخیره‌سازی شده باشد و علاوه بر آن باید غلظت چسب خاص سیستمهای دو جزئی مورد استفاده قرار گیرد. مهمترین عضو این خانواده از رزینهای اپوکسی، یک رزین مایع با وزن مولکولی متوسط در حدود ۳۷۰ می‌باشد. این ماده از نسبت مولی ده به یک اپی کلروهیدرین و بیس فنول A ساخته می‌شود. رزینهای تجارتي این نوع اپوکسی از وزن هم ارز ۱۸۰ تا ۲۰۰ و گرانیوی ۱۰۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰۰ (سانتی‌پواز) در ۲۵°C پر خوردارند. مقدار درصد n برای مقادیر ۱، ۰ و ۲ به ترتیب ۸۷/۲، ۱۱/۱ و ۱/۵ می‌باشد [4].

ویژگیهای چسب اپوکسی

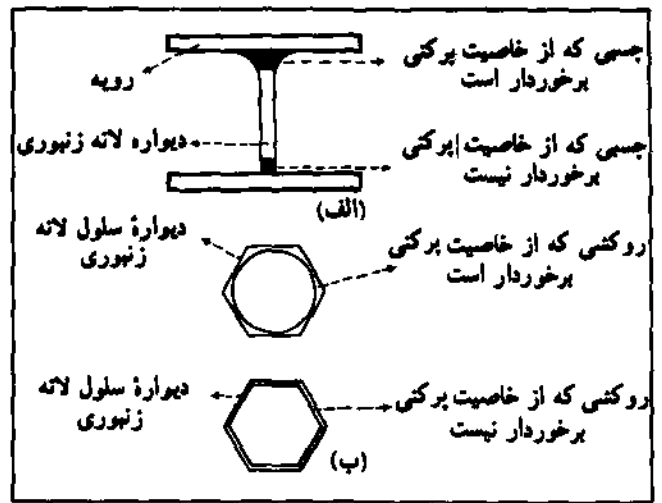
— چسبندگی: برای چسباندن طیف وسیعی از مواد، اپوکسیها بهترین انتخاب می‌باشند. این چسبها به اغلب فلزات، پلاستیکها، چوب، شیشه، بتون و سرامیک به خوبی می‌چسبند که به علت قابلیت نفوذ و ترکندگی، گرانیوی پایین و حضور گروههای به شدت قطبی در مولکول است. قابلیت بالای ترکندگی این امکان را می‌دهد که تماس نزدیک اپوکسی با سطح برقرار شود که این نیز به نوبه خود نیروهای چسبندگی را فعال می‌سازد. اینکه مولکول اپوکسی حاوی انواع گروههای عاملی قطبی و غیر قطبی است، نیز یک ویژگی ممتاز به حساب می‌آید، زیرا به علت وجود این گروهها میل ترکیبی میان مواد مختلف نظیر فلز به پلاستیک، کاغذ به آلومینیم و نظایر آن به خوبی حاصل می‌شود. عموماً اپوکسیها هر ماده‌ای را که با سایر چسبها تر شود، تر می‌کنند، به شرط آنکه کشش سطحی کم یا توسط روشهای آماده‌سازی سطح به حد کافی پایین آورده شده باشند. چسبندگی و ترکندگی خوب از دلایل عمده برتری اپوکسی نسبت به سایر چسبهاست.

— همچسبی: استحکام درونی اپوکسی در مقابله با شکست همچسبی عموماً خوب است ولی به شدت تحت تأثیر پرکننده، اصلاح کننده و ضخامت خط چسب قرار می‌گیرد. در صورت اجرای صحیح فرایند آماده‌سازی سطح، استحکام درونی اپوکسی از فلزات، پلاستیک، شیشه، بتون و نظایر آنها بیشتر خواهد بود.

— صندرد چسبندگی: بدون آزاد شدن آب یا سایر محصولات جانبی انجام می‌شود. حالت صندرد چسبندگی جامد در یک چسب، به میزان قابل ملاحظه‌ای از تولید گازهای محبوس، حفره و تسخخل در خط چسب می‌کاهد. طبیعی است که در صورت بروز این عوامل، استحکام چسب به شدت کاهش می‌یابد. حلال و رطوبت حبس شده در خط چسب، شکل خوردگی را به ویژه در چسباندن فلزات بارز می‌سازند. به همین دلیل، بر

خلاف فنولها (به علت دفع آب) و امولسیونهای لاستیکی (به علت دفع حلال)، اپوکسی را به شکل موفق می توان تنها با اعمال فشار ناچیز برای چسباندن انواع فلزی و غیر فلزی لانه زنبوری به رویه های فلزی به کار گرفت.

— خود پرکنی: خاصیت خود پرکنی (self-filleting) در اپوکسی بی نظیر است. این ویژگی در چسبهای اپوکسی یا زوکشهای اپوکسی برای لانه زنبوری اهمیت می یابد. در مورد چسب رویه به مغزه، اپوکسی به علت ترکندگی بسیار مطلوب به سهولت خلل و فرج و گوشه ها را با جریان سریع پر می کند و دستیابی به بالاترین درجه استحکام صفحه ساندویچی را ممکن می سازد [5, 6] (شکل ۳ - الف). هنگامی که از اپوکسی به شکل خالص یا آلیاژ به عنوان روکش لانه زنبوری استفاده می شود، به سبب پر کردن گوشه های سلولهای شش ضلعی درجه تثبیت ابعاد سلول و استحکام آن را به بالاترین حد ممکن می رساند (شکل ۳ - ب).



شکل ۳ - خاصیت پرکنی در چسب رویه به مغزه در یک صفحه ساندویچی (الف)، خاصیت پرکنی در روکش لانه زنبوری (ب).

به حداقل مقدار می رسد و به همین سبب موقع انتخاب چسب با کمترین میزان تنش، اپوکسی با دوره پخت کوتاه را می توان بهترین انتخاب دانست. پخت اپوکسی در دما و فشار بالا معمولاً مقاومت شیمیایی و گرمایی بالاتری به دست می دهد. اغلب چسبهای اپوکسی نسبت به تغییرات ضخامت خط چسب از حساسیت کمتری در قیاس با سایر چسبها برخوردارند. به همین علت، اعمال تغییرات و میسر فشار و دمای پخت در این مورد مجاز می باشد. روشن است که تولید با سهولت و سرعت بیشتری صورت می گیرد و این در حالی است که خطاهای مجاز تولید نیز حفظ می شود.

— خزش ناچیز زیر بار: اپوکسی پخت شده، شکل خود را زیر تنشهای مداوم و شرایط محیطی بد به خوبی حفظ می کند. خزش یا جریان سرد در حالی که بارگذاری مکانیکی بحرانی باشد، یک موضوع جدی است. از آنجا که چسبهای اپوکسی در چنین شرایطی مطلوب عمل می کنند، یک انتخاب معقول و منطقی خواهند بود.

— مقاومت در برابر رطوبت و حلالها: برخلاف چسبهای دیگر، اپوکسی پخت شده در عمل نسبت به رطوبت حساس نیست. گرچه رطوبت در خط اتصال اپوکسی مشکلاتی را به وجود می آورد، ولی اثر تخریبی جدی بر خواص همچوسی آن ندارد. گاهی از آسترهای دارای وینیل یا لاستیک به عنوان ضدآب استفاده می شود. این آستر معمولاً چسبندگی اپوکسی را افزایش نمی دهد و استفاده از آن هنگامی مجاز است که استحکام درازمدت مورد نظر باشد. استفاده از آستر معمولاً استحکام پیوند اپوکسی را کاهش می دهد، ولی از آنجا که وظیفه آستر حفاظت در برابر خوردگی است، خط اتصال علی رغم استحکام کمتر، دوام بیشتری خواهد داشت. در برابر مواد شیمیایی، همه چسبهای اپوکسی خوب عمل نمی کنند، زیرا ماهیت نوع مواد شیمیایی، غلظت و دمای آنها، طراحی اتصال، خسار سطح چسب خورده و محیط همگی از این نظر مؤثرند.

— اصلاح پذیری: سازگاری این رزین با بسیاری از اصلاح کننده ها، فرمولبندی آنها را برای طیف وسیعی از کاربرد ممکن ساخته است. بسیاری از اپوکسیها اصلاح نشده اند و بعد از پخت به یک ماده سخت و شکننده تبدیل می شوند. بدین ترتیب استفاده از آنها در دماهای پایین، دماهای سرمایی، برای بارگذاری ضربه ای یا در مواردی که مشخصات خوب جذب تنش نیاز باشد، ناممکن می شود. چسبهای اپوکسی با روشهای زیر اصلاح می شوند.

اصلاح شیمیایی خود رزین
اصلاح شیمیایی معمولاً شامل تغییرات وزن هم ارز، افزایش گرانشی و گروههای هیدروکسیل است. با وجود این، با استفاده از سایر مواد فعال

— جمع شدگی ناچیز: پخت اپوکسی در مقایسه با سایر گرماسختها با جمع شدگی (shrinkage) بسیار ناچیزی همراه است. روشن است که در این حالت، تنشهای حاصل از جمع شدگی به حداقل مقدار می رسد و منجر به تولید اتصالی پایا تر و قوی تر می شود. چنین تنشهایی از تفاوت فاحش در ضریب انبساط گرمایی نیز می تواند به وجود آید. در هر حال اپوکسی برای چنین شرایطی، بهترین انتخاب است.

— پخت با فشار و گرمای کم: اغلب سیستمهای اپوکسی را می توان با اعمال فشار بسیار ناچیز در دمای اتاق پخت کرد. با وجود این، انواع بسیاری از چسبهای اپوکسی هم موجودند که در صورت پخت با اعمال فشار و گرما، نتایج مطلوبتری به دست می دهند. تنشهای داخلی موقع پخت در دمای پایین

می‌توان طیف وسیعی از رزینهای اپوکسی را ساخت که از خواص بسیار متفاوت با رزین بیس-اپی برخوردار باشند. برای مثال، استفاده از رزینهای نووالاک، پایداری گرمایی و گرانروی را افزایش می‌دهد. استفاده از دی‌آلها و تری‌آلها، رزینهایی به دست می‌دهد که از مقاومت بالاتر در برابر ضربه و مقاومت گرمایی پایبندتری برخوردارند. استفاده از ترکیبات هالوژن‌دار، ضمن افزایش چگالی و قیمت، اپوکسی را اشتعال‌ناپذیر می‌سازد. با استفاده از ترکیبات چند عاملی، رزینهای دارای سه یا چهار گروه اپوکسی به دست می‌آید که ضمن پخت پیوندهای عرضی بیشتری به وجود می‌آورند ولی کاهش مقاومت در برابر ضربه و افزایش قیمت را سبب می‌شوند. ترکیبات سیکلوآلیفاتیک نیز رزینهایی با خواص الکتریکی بهتر نتیجه می‌دهند ولی پخت‌پذیری آنها در دمای اتاق کاهش می‌یابد.

اصلاح یا عوامل پخت

چسب اپوکسی با افزودن یک ترکیب شیمیایی فعال از حالت مایع گرمانرم به حالت جامد گرماسخت تبدیل می‌شود. عامل پخت ممکن است کاتالیزوری باشد که پلیمر شدن اپوکسی را سرعت بخشد یا ترکیبی باشد که به طور مستقیم در واکنش شرکت کرده و با زنجیرهای رزین به طریق شیمیایی پیوند برقرار کند. از سایر مواد شیمیایی فعال می‌توان جهت تند یا کند کردن واکنش پخت استفاده کرد. هر عامل پختی، ساختار شبکه‌ای متفاوتی را بعد از پخت ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، استفاده از آمین نوع اول و دوم، پخت سریع در دمای اتاق را موجب می‌شود، ولی بخارات حاصل از پخت ایجاد حساسیت می‌کند و مقاومت گرمایی محصول کم است. استفاده از پلی‌آمیدها، ضمن افزایش مقاومت در برابر ضربه، از مقاومت گرمایی و شیمیایی محصول می‌کاهد. آمینهای آروماتیک، عمر کاری طولانی و مقاومت گرمایی و شیمیایی بالا را باعث می‌شوند. پخت این دسته در آن صورت می‌گیرد، کمپلکسهای اسید لوویس چسبهایی با سرعت پخت بالا به دست می‌دهند، ولی خواص مکانیکی این گونه چسبها ضعیف است و استفاده از آنها در خط تولید با مشکل روبرو می‌شود. ایندیردها، پایداری در دمای بالا را موجب می‌شوند، ولی بخار آنها اسیدی است و باید پخت در آن صورت پذیرد. این دسته از چسبها عمر کاری کوتاهی دارند، زیرا توزیع عامل پخت در رزین مستلزم اعمال گرماسختی بیش از صد نوع عامل پخت برای اپوکسی موجود است. در فرمولبندی چسبهای اپوکسی، بسته به خواص موردنیاز از پرکننده‌ها، رقیق‌کننده‌های فعال و غیرفعال هم می‌توان استفاده کرد [3, 4, 5, 7].

آلیاژسازی با سایر رزینها

در این مورد هم تنوع زیاد است، ولی از مهمترین آلیاژهای اپوکسی می‌توان آلیاژ نیتریل - اپوکسی، پلی‌کلروپرن - اپوکسی و اپوکسی - فنولی را نام برد. در مورد لاستیکهای نیتریل و کلروپرن،

امروزه نوع مایع این دو لاستیک متداول است که با جرم مولکولی پایین و گروههای عاملی فعال در دو انتهای زنجیر عرضه می‌شوند. در مورد نیتریل دو نوع ATBN (با پایانه آمین) و CTBN (با پایانه کربوکسیل) از همه متداولترند. در خصوص نوع جامد این لاستیکها، سیستم حلال موردنیاز است. بهترین حلال مشترک این آلیاژ، متیل اتیل کتون، MEK، می‌باشد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، برای ورقه‌های لانه زنبوری چسب اپوکسی به هر شکلی توصیه نمی‌شود ولی برای اتصال رویه به مغزه بهترین انتخاب است. در مواردی که استحکام برشی بالا موردنیاز شدید باشد، استفاده از آمینهای آلیفاتیک مثل تری‌اتیلن تتر‌آمین در ترکیب با اپوکسی بالاترین استحکام را به دست می‌دهد. به علاوه، خود عامل پخت به عنوان عامل منطف کننده هم عمل می‌کند. در این حالت، پخت در دمای اتاق صورت می‌گیرد. در مورد آلیاژ نیتریل - اپوکسی، دو نوع چسب ساختاری و تماسی را می‌توان سنتز کرد. برای نوع ساختاری استفاده از عوامل پخت برای هر دو جزء آلیاژ الزامی است. به این منظور، انتخاب عامل پخت گسگریدی (برای لاستیک) و یک آمین آروماتیک مثل متلفنیل‌دی‌آمین یا اورتو-فنیل‌دی‌آمین (برای اپوکسی) از همه بهتر است. در کنار گسگرید، از اکسیدهای فلزی مثل روی اکسید و استناریک اسید و یک شتاب‌دهنده هم باید استفاده کرد. انتخاب آمین آروماتیک به طور عمده به دلیل عمر کاری طولانی است. تنها مشکل، جامد بودن آن است که در حلال آلیاژ، MEK به سهولت حل می‌شود. برای کلروپرن، تنها تفاوت نوع عامل پخت است. معمولاً از ترکیب اکسیدهای فلزی روی و منیزیم استفاده می‌شود. بسته به ویژگی کاربرد، عامل پخت مناسبتری (مثل سرب اکسید) را می‌توان انتخاب کرد. در مجموع نتیجه‌گیری حاکی از بهینه بودن آلیاژ اپوکسی - نیتریل است. در صورت نیاز محیط کاربرد به مقاومت گرمایی بالا از آلیاژ نیتریل - اپوکسی به همراه فنولها استفاده می‌شود. درصد هر جزء در آلیاژ بسته به خواص تغییر می‌کند. قابل توجه است که چسبهای مصرفی در اتصال رویه به مغزه به طور عمده در شکل فیلم تولید می‌شوند. در مورد چسبهای تماسی این آلیاژ، استفاده از درصد مساوی از هر دو جزء در یک حلال مشابه مانند MEK چسب مناسبی به دست می‌دهد [4, 8].

در مجموع با توجه به عدم دسترسی مستقیم به این نوع رزین، قیمت بالا، عدم ایمنی استفاده از عوامل پخت (بجز پلی‌آمینهای افزایشی (adduct)) و عمر کوتاه نگهداری و کاری، استفاده از این چسبها بسیار محدود می‌شود. به این ترتیب، به عنوان چسب رویه به مغزه، دومین انتخاب بر پایه فنولهاست که در بسیاری از موارد جوابگوی نیازهای طراحی می‌باشند. این چسبها برای چسباندن ورقه‌های لانه زنبوری از همه مطلوبترند.

چسبهای فنولی

رزینهای فنولی، محصول واکنش فنول یا فنولهای استخلاف شده

زمان، دما، pH و نسبت فنول به فرمالدهید انجام می‌گیرد. واکنش پذیری با افزایش pH بالا می‌رود. پخت رزول بدون نیاز به یک ماده دیگر، تنها با افزایش دما انجام می‌شود، زیرا جمع گروه‌های عاملی بیش از ۲ است. نسبت پیوندهای متیلن به متیلن‌اتر در رزین نهایی پخت شده نه تنها به نسبت اولیه فرمالدهید به فنول بلکه به pH و دمای پخت نیز بستگی دارد. در pH خنثی، پیوندهای متیلن‌اتری بیشتر تشکیل می‌شود و در pH بالا یا پایین، شرایط برای تشکیل پیوندهای متیلنی مساعدتر است. با افزایش دما، متیلن‌اترها ناپایدار شده و در $130^{\circ}C$ تجزیه می‌شوند و یک مول فرمالدهید آزاد می‌کنند. در بالاتر از $160^{\circ}C$ ، تنها پیوندهای متیلنی تشکیل می‌شود. وزن مولکولی رزولهای تک مرحله‌ای از دستکم ۱۵۰ (محلول در آب) تا ۱۰۰۰ یا بالاتر (جامد آسیاب‌پذیر) تغییر می‌کند. برای سیستمهای سخت و انعطاف‌ناپذیر لانه‌زنبوری از رزول محلول در آب به عنوان رزین روکش می‌توان استفاده کرد.

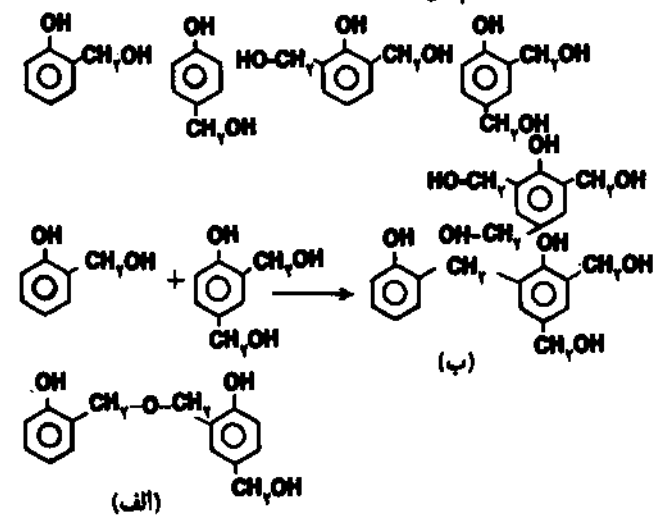
— نووالاک: واکنش یک مول فنول با کمتر از یک مول فرمالدهید، در حضور کاتالیزور اسیدی، نووالاک به دست می‌دهد. این دسته رزینها تنها از پیوندهای متیلنی برخوردارند و زنجیر پلیمری در آنها به فنول ختم می‌شود. روشن است که نووالاک فاقد گروه‌های متیلول و پیوندهای متیلن‌اتری موجود در رزول می‌باشد. به همین دلیل، این رزین واکنش‌پذیری بیشتر را بدون افزایش فرمالدهید اضافی نخواهد داشت. $HMTA$ ، نووالاک واکنش‌ناپذیر گرم‌انرم را با اعمال گرما به یک گرماسخت تبدیل می‌کند. در شرایط اسیدی، فرمالدهید با فنول واکنش می‌دهد و یک مولکول مونومتیلول فنول به دست می‌آید. ترکیب اخیر به سرعت با یک مول فنول دیگر واکنش می‌دهد و دی‌هیدروکسی دی‌فنیل متان به وجود می‌آورد. افزایش وزن مولکولی در اثر واکنش این ترکیب با فرمالدهید و فنول بیشتر حاصل می‌شود. به جای $HMTA$ از پارا‌فرمالدهید یا تری‌اکسان هم می‌توان استفاده کرد. برای اغلب کاربردها از جمله چسب‌کاری، استفاده از ۱۰ درصد $HMTA$ متداول است. وزن مولکولی نووالاک بین ۵۰۰ تا ۹۰۰ تغییر می‌کند.

— رزینهای استخلاف‌نده: فنولهای استخلاف‌نده در موقعیت اورتو یا پارا دو عاملی بوده و شبکه‌ای نمی‌شوند. مهترین رزین در این دسته، پارا‌ترشیو بوتیل فنول است که با افزایش خواص گرم‌انرمی چسب، چسبندگی به سطوح را افزایش می‌دهد. فنول بعدی کرزول است. کرزول با خلوص صنعتی، عموماً مخلوط متا و پارا می‌باشد. ایزومر متا، سه عاملی است و در نتیجه شبکه‌ای می‌شود [4].

فنولها یا در شکل خالص یا به عنوان بخشی از فرمولبندی مصرف می‌شوند. در ساخت چسبهای لانه‌زنبوری، حالت دوم مورد نظر است. از فنولها در حالت اول می‌توان به عنوان روکش سخت استفاده کرد. اشاره می‌شود که استفاده از فنولها در شکل خالص برای

با فرمالدهید می‌باشند. تنوع رزینهای فنولی بسته به انتخاب فنول، نسبت مولی آن به فرمالدهید، نوع و مقدار کاتالیزور مصرفی، زمان و دمای واکنش نامحدود است. فنولهای مهم تجارتي عبارت‌انداز: فنول، کرزول، زایلنول، پارا — ترشیو بوتیل فنول، پارا — آمیل فنول، پارا‌فنیل فنول، پارا‌اکتیل فنول و پارا‌نویل فنول. نسبت مولی فنول به فرمالدهید و نوع کاتالیزور مصرفی تعیین می‌کنند که زنجیر پلیمر به فنول ختم شود یا متیلول. در حالت اول، رزین حاصل موسوم به نووالاک بوده و اصطلاحاً دو مرحله‌ای است. چنین رزینی گرما فعال نیست و تا افزودن عامل پخت نظیر هگزامتیلن تترآمین ($HMTA$)، پخت مؤثر در آن انجام نمی‌شود. در صورت وجود گروه متیلول در انتهای زنجیر، رزول حاصل می‌شود که اصطلاحاً تک مرحله‌ای است. این نوع رزین، گرما فعال است و به استثنای حالتی که بر پایه یک فنول دو عاملی باشد، با اعمال گرما به یک گرماسخت تبدیل می‌شود.

— رزول: مکانهای فعال مولکول فنول، دو محل اورتو و یک موقعیت پارا می‌باشد. وقتی بیش از یک مول فرمالدهید با یک مول فنول در حضور کاتالیزور قلیایی واکنش دهد، محصولاتی نظیر اورتو متیلول فنول و پارا متیلول فنول به دست می‌آید. گرمادهی بیشتر محصولات اولیه منجر به تراکم و افزایش وزن مولکولی می‌شود. عمل تراکم یا بین دو گروه متیلول (تشکیل پیوندهای متیلن‌اتری، شکل ۲ — الف) یا بین یک گروه متیلول و یک هیدروژن فعال از موقعیت اورتو یا پارا (تشکیل پیوندهای متیلنی، شکل ۲ — ب) انجام می‌شود.



شکل ۲ — تشکیل پیوندهای متیلن‌اتری (الف)، تشکیل پیوندهای متیلنی (ب)، [4]

مقدار گرما تعیین‌کننده شکل نهایی محصول، رزین مایع محلول در آب، رزین غلیظ با اختلاط پذیری کمتر و جامد آسیاب‌پذیر، است. با پیشرفت واکنش، رزول زل می‌شود. به همین دلیل واکنش با کنترل دقیق

آغشته‌سازی لانه‌زنبوری، محدود به رزول یا نووالاک می‌شود. ولی، در حالت دوم از سه نوع رزین یعنی رزول، نووالاک و رزول استخلاف شده می‌توان استفاده کرد. از ترکیب اخیر برای افزایش چسبندگی لاستیکهای نسبتاً غیر قطبی استفاده می‌شود که از این راه خاصیت ترکندگی تسوده چسب بهبود می‌یابد. ولی، نوع پخت‌شونده در دسترس به پایداری شیمیایی و گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اغلب لاستیکهای مصنوعی و طبیعی از چسبندگی (tack) ناچیزی برخوردارند. رزینهای استخلاف شده فنولی به طور عمده بر پایه پارا-ترشیو بوتیل فنول، قابلیت ترشوندگی لاستیکها را از راه افزایش قطبیت و تغییر خواص و سکوالاتیک توده چسب افزایش می‌دهند. افزایش قطبیت به طور عمده ناشی از حضور گروههای هیدروکسیل فنول و در مورد رزینهای گرما فعال، گروههای اتری و هیدروکسیل آلیفاتیک می‌باشند. رزین، تغییر شکل پلاستیک را از راه کاهش برگشت پذیری کشسان تسهیل می‌کند که نتیجه آن برقراری تماس بسیار نزدیک با سطوح و در نهایت استحکام بیشتر اتصال است. تغییر شکل پلاستیک ناشی از قابلیت رزین در حل کردن مقداری از ماده لاستیکی و تشکیل یک فاز مجزا است. میزان این فاز به سازگاری رزین و لاستیک وابسته است. در مورد لاستیکهای قطبیتز مثل پلی‌کلورپرن، این رزین بسیار مؤثر عمل می‌کند. برای لاستیکهای با قطبیت کمتر مثل بوتیل و SBR، رزینهای استخلاف شده دارای زنجیرهای بلند تراکتیل و نونیل ترجیح داده می‌شوند [3]. مهمترین کاربرد این نوع رزینهای فنولی، ساخت چسبهای تماسی است که می‌توان آنها را برای مصارف غیر ساختاری لانه‌زنبوری انتخاب کرد. مشخصه این چسبها، چسبندگی بسیار بالا و استحکام پوستگی مطلوب و عالی است که از این جهت، آلیاژهای پلی‌کلورپرن - فنولی و نیتریل - فنولی از همه مهمترند.

آلیاژ پلی‌کلورپرن - فنولی

فرمولبندی این چسب به طور عمده شامل کلورپرن، رزین فنولی و مخلوط حلال است. از ضد اکسند و اکسیدهای روی و منیزیم (به عنوان جاذب HCl و عامل اتصال) نیز استفاده می‌شود. منیزیم اکسید با رزین فنولی، یک کمپلکس فلزی انحلال پذیر ولی غیر قابل ذوب تشکیل می‌دهد. این کمپلکس استحکام همچسبی چسب را در دمای اتاق و در دماهای بالا بهبود می‌بخشد. برای کاهش هزینه و کنترل سرعت تبخیر چسب، از مخلوط حلال شامل تولوئن، کتون و هیدروکربنهای آلیفاتیک استفاده می‌شود. ساده‌ترین روش، ریختن مواد یادشده در مخلوط حلال و اختلاط آنهاست. ولی، به علت گرانی زیاد لاستیک، میزان درصد جامد کم خواهد بود. پارامترهای مهم در چسبهای تماسی، زمان باز (open time)، استحکام همچسبی و دوفازی شدن است. در شرایط معمولی، استحکام همچسبی با زمان باز افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک ماکسیمم، کاهش می‌یابد. به عنوان یک سیستم ایده‌آل، زمان باز طولانی و افزایش سریع استحکام چسب در یک مدت کوتاه مورد نظر است. زمان باز با نوع کلورپرن، فنولی

و مقدار این دو تغییر می‌کند. انواع کلورپرنها (نوپرنهای AC، AD و AF) از زمان باز کوتاهی برخوردارند. افزودن کلورپرنی با سرعت تبلور کمتر، این زمان را افزایش می‌دهد. کمپلکس شدن رزین فنولی، با اکسید فلزی هم این زمان را کاهش می‌دهد که علت آن تبخیر بسیار سریع حلال است. مقاومت گرمایی این نوع چسب را می‌توان با اندازه‌گیری استحکام برشی و پوستگی بر حسب دما سنجید. کلورپرنهای AC و AD در دمای اتاق به علت استحکام همچسبی زیاد، تبلور می‌شوند. ولی، در دماهای بالاتر از 60°C ، به میزان قابل ملاحظه‌ای از این استحکام کاسته می‌شود. افزودن رزین به چسب، باعث حفظ استحکام در دماهای بالاتر از 60°C تا حد 93°C می‌شود. چسبهای تماسی کلورپرن با مقاومت گرمایی بالاتر را می‌توان با کلورپرنهای ختم شده به کربوکیل (نوپرن AF) سنتز کرد. دو فازی شدن چسب هم تابع نوع کلورپرن مصرفی، مخلوط حلال، درصد جامد و سابقه گرمایی است. برای کاربردهای ساختاری لانه‌زنبوری می‌توان چسب ساختاری کلورپرن - فنولی را انتخاب کرد. در این صورت بسته به نیاز، از عوامل قویتر پخت مثل سرب اکسید و رزین پخت فنولی (رزول یا نووالاک) استفاده می‌شود. در حالت ساختاری نیازی به استفاده از لاستیک با سرعت بلوری شدن بالانست و انواع رزینهای مصارف عمومی مثل (نوپرن W) را می‌توان به کار گرفت [4,9].

آلیاژ نیتریل - فنولی

از قطبیت بالای نیتریل و مقاومت آن در برابر روغن و نرم‌کننده‌ها می‌توان در چسب کاری بهره جست. این لاستیک از چسبندگی پایینی برخوردار است و در نتیجه چسبندگی ضعیفی به محض تماس خواهد داشت. از رزینهای رزول و نووالاک می‌توان برای بهبود مقاومت گرمایی، چسبندگی و کمک به تبخیر حلال استفاده کرد. ساده‌ترین و عمومیترین فرمولبندی این نوع چسب، شامل مقادیر مساوی از هر دو رزین در مخلوط حلال می‌باشد. این فرمولبندی در مصارف غیر ساختاری لانه‌زنبوری نیز قابل استفاده است. در این مورد هم، زمان باز، مهمترین پارامتر طراحی است که به راحتی محاسبه می‌شود.

از رزول و نووالاک اصلاح شده با HMTA در چسبهای ساختاری نیتریل - فنولی استفاده می‌شود. بدین ترتیب استحکام، دوام و مقاومت گرمایی لازم برای این آلیاژ فراهم می‌شود. اشاره می‌شود که یکی از دلایل آلیاژسازی فنولها با لاستیکهای نظیر نیتریل و کلورپرن یا اپوکسی و وینیلها، کاهش جمع‌شدگی و رهایی تنش در یک اتصال ساختاری است. در مورد چسبهای نیتریل - فنولی به تفصیل بحث خواهد شد [4].

آلیاژ وینیل - فنولی

این آلیاژ به طور عمده مصرف ساختاری دارد. ساختار پلی وینیل استالی

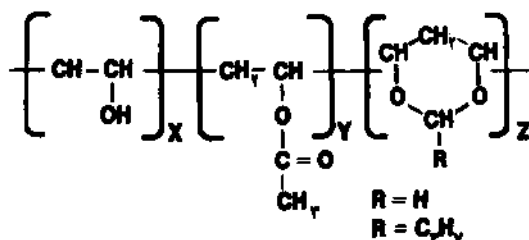
چسب مناسب و بهینه برای ساخت شبکه‌های لانه‌زنبوری و چسب نیتریل - فتولی است که در مقاله بعد به بحث درباره این چسب و کارهای انجام شده جهت بهینه‌سازی آن خواهیم پرداخت.



REFERENCES

- [1] Harper, C. A. "Handbook of Plastics and Elastomers", McGraw-Hill (1975).
- [2] Landrock, A. H. "Adhesives Technology Handbook". Noyes Publications (1985).
- [3] Cagle, C. "Handbook of Adhesive Bonding", McGraw-Hill (1973).
- [4] Skiest, I. "Handbook of Adhesives", Van Nostrand Reinhold (1977).
- [5] SRI. "Epoxy Formulations", (1984).
- [6] Adams, R. D & Wake, W. C. "Structural Adhesive Joints in Engineering". Elsevier Applied Science Publishers (1986).
- [7] Driver, W. E. "Plastics Chemistry and Technology", Van Nostrand Reinhold (1979).
- [8] Blow, C. M and Hepburn, C. "Rubber Technology and Manufacture". Butterworths (1987).
- [9] Keramedjian, J. "Heat - Reactive Phenolic Resins in Neoprene Contact Cements". Adhesives Age (June 1962).
- [10] Schneberger, G. L. "Adhesives in Manufacturing", (1983).

که همراه با رزینهای فتولی در چسبهای ساختاری مصرف می‌شود به این ترتیب است:



در صورتی که R، اتم هیدروژن باشد، پلیمر حاصل پلی‌وینیل فرمال و در حالتی که R، گروه پروپیل باشد، پلیمر حاصل پلی‌وینیل بوتیرال خواهد بود. رزین فتولی مصرفی در این آلیاز، رزول است. گروههای متیلول رزول می‌توانند با گروههای هیدروکسیل پلی‌وینیل استال واکنش دهند. بدین ترتیب، درصد هیدروکسیل، عامل مهم در انتخاب استال می‌باشد. نسبت رزین به وینیل بسته به استحکام کششی، خزش و مقاومت گرمایی مورد نیاز از ۱/۰ تا ۳/۱ تا ۲ تغییر می‌کند. حلال مصرفی الکل است و برای بهینه‌سازی از مخلوط آن با حلالهای دیگر می‌توان استفاده کرد. این چسبها بسته به فرمولبندی در دمای ۱۴۰ تا ۱۸۰°C و فشار ۱۰۰ تا ۴۰۰ psi پخت می‌شوند. چسبهای ساختاری وینیل - فتولی در صورتی که دمای کاربرد لانه زنبوری به‌طور مداوم ۱۰۰°C باشد، بسیار مناسب‌اند. مقاومت در برابر ضربه، مقاومت گرمایی و استحکام پوستگی این چسب از آلیاز نیتریل - فتولی کمتر است. (در صورتی که دمای کاربرد لانه‌زنبوری به‌طور مداوم حدود ۱۲۰°C باشد، آلیاز نیتریل - فتولی مطلوبتر است) [4, 10].

آلیاز اپوکسی - فتولی

این آلیاز در صورتی که دمای کاربرد لانه‌زنبوری از ۱۵۰°C فراتر رود، مناسب است. ولی، به علت چگالی بالای شبکه پخت شده، آلیاز یاد شده استحکام پوستگی کمی دارد. این آلیاز از راه واکنش اپوکسی با هیدروکسیل رزین فتولی پخت می‌شود، در نتیجه از هر دو نوع رزین فتولی رزول و نووالاک می‌توان استفاده کرد. در صورت استفاده از رزول، رزین اپوکسی با گروههای متیلول حلقه‌های فتول هم واکنش می‌دهد [1, 4].

نتیجه‌گیری

چسب مناسب برای اتصال اجزای یک صفحه ساندویچی و همین‌طور خود ورقه‌های لانه‌زنبوری باید با توجه به شرایط کاربرد و فرایند انتخاب شود. با توجه به مطالبی که در مورد دو پارامتر اخیر یعنی شرایط کاربرد و فرایند در مقاله مطرح شد، چسبهای دویا به مناسبترند. طبیعی است که هیچ چسبی نمی‌توان یافت که برای تمام شرایط فرایند و کاربرد ایده‌آل باشد به همین دلیل باید بهترین نمونه موجود را انتخاب کرد. با توجه به این مطلب،