دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰
DOI: 10.22034/jtae.2022.145237

(علمی – ترویجی)

چسب‌های سازه‌های فضایی، مبانی، تولید و تأثیرپذیری از محیط فضا

هاجر اسحاقی*[۱]، مجید حقگو **[۱] و حامد صالحی *[۱]**

۱- پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، کدپستی: ۱۳۴۵۵-۷۵۴

* استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:
h.eshaghi@isrc.ac.ir
** استادیار
*** دانشیار

چسب‌ها و اتصالات چسبی به دلیل ایجاد کاهش چشمگیر در جرم فضاپیماها و دارا بودن چندین ویژگی بطور همزمان (خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی متناسب با کاربرد) جایگزین روش‌های متداولی چون پرچ کردن، جوشکاری و سایر اتصالات مکانیکی به‌عنوان یک روش با ارزش برای مونتاژ سامانه‌های فضایی شده‌اند. چسب‌های سازه‌های فضایی در کنار داشتن خواص منحصر به فرد، توانایی کاربری طولانی مدت و مقاومت در برابر مولفه‌های محیط فضایی را نیز دارا می‌باشند. این چسب‌ها به منظور اتصال سازه‌های هم جنس-فلزی یا کامپوزیتی و سازه‌های ترکیبی فلز/کامپوزیت بکار گرفته می‌شوند. در این تحقیق تلاش شده است به معرفی انواع چسب‌ها، روش‌های تولیدی، نحوه‌های اعمال و کاربرد آن ها در این صنعت پرداخته شود. در ادامه محیط فضا و مولفه‌های آن همچون ذرات باردار پرانرژی، تابش‌های الکترومغناطیسی خورشیدی و اکسیژن اتمی معرفی شده‌اند و در نهایت تأثیر مولفه‌ها بر برخی از خواص و مکانیسم‌های تخریب آن ها بحث شده است.

واژه‌های کلیدی: چسب سازه‌های فضایی، محیط فضایی، پرتو فرابنفش، ذرات باردار، اکسیژن اتمی

Space Adhesives: Fundamentals, Preparation, and Impact of Space Environment

Adhesives and adhesive joints have replaced conventional methods such as riveting, welding, and mechanical joints as a valuable way for assembling space structures, due to their significant reduction in spacecraft mass and also having optimum properties (high mechanical, electrical, and thermal properties, simultaneously, appropriate to the application). Space adhesives, in addition to having unique properties, have the ability to be used for a long time and are resistant to the space environment. These adhesives are used to bond similar structures (metal or composite) and metal / composite structures. In this research, an attempt has been made to introduce the types of adhesives, their production methods, and theire application. The space environment and its components such as energetic charged particles, solar electromagnetic radiation and atomic oxygen are introduced and finally the effect of the components on their properties and mechanisms of their destruction are discussed.

Keywords: Space Adhesive, Space Environment, Ultraviolet, Charged Particles, Atomic Oxygen

H. Eshaghi[1*], M. Haghgoo[1], and H. Salehi[1***]**

1- Space Transportation Research Institute, Iran Space Research Center, Postal Code: 13455-754, Tehran, IRAN

* Assistant Professor (Corresponding Author): Email:
h.eshaghi@isrc.ac.ir
** Assistant Professor
*** Associate Professor

(علمی-ترویجی)

هاجر اسحاقی، مجید حقگو و حامد صالحی

۱- مقدمه

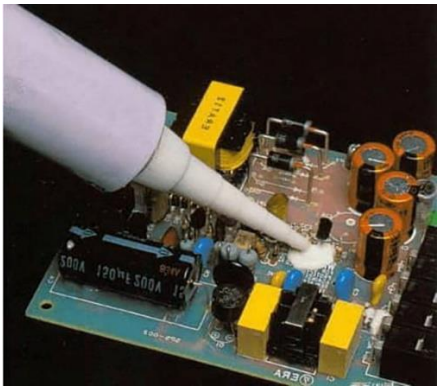
فضاپیماها و سامانه‌های فضایی به‌طورکلی نسبت به اولین سامانه‌ای که در سال ۱۹۵۷ (اسپوتنیک – ۱ شوروی) به فضا پرتاب شدند به‌طور چشمگیری تکامل پیدا کرده‌اند. نیازهای جدید در مأموریت‌ها منجر به افزایش چشمگیری در اندازه‌ها و جرم فضاپیماها می‌شود. همچنین، محدودیت‌های پرتابگرها نیز منجر به بهینه‌سازی طراحی ماهواره‌ها با رویکرد کاهش تعداد قطعات و محدودکردن جرم آن‌ها همراه می‌باشد (شکل **۱**). با درنظرگرفتن این محدودیت‌ها، وجود سفینه‌های فضایی که به طورعمده متشکل از مواد فلزی سنگین هستند و به شدت متاثر از محیط فضایی نیز می باشند، معقول به نظر نمی‌آید. از این‌رو، استفاده از مواد پلیمری و کامپوزیت‌ها در سیستم‌های فضایی توسعه یافته است [۲-۱]. بطوریکه ماهواره‌های فعلی، مواد آلی مختلفی را برای کاربردهای مختلف در خود جای داده‌اند [۳]. قابل ذکر است به موازات کاهش جرم، مدت زمان مأموریت‌های فضایی نیز افزایش یافته و گاهی ماهواره‌ها باید بیش از ۱۵ سال در مدارها، بدون تخریب فعال باشند. بنابراین، یکی دیگر از محرک‌های اصلی طراحی سفینه‌ها با استفاده از مواد پلیمری، توانایی کنترل و تنظیم رفتار مواد پلیمری در محیط فضایی است [۴].

شکل (۱): ماهواره‌ها در معرض محیط‌های با اختلاف درجه حرارت بسیار متفاوت بر اساس قرار گیری در برابر خورشید یا پشت به آن [۳].

یکی از خانواده‌های بزرگ مواد پلیمری پرکاربرد در صنعت توسعه یافته فضایی چسب‌ها می‌باشند. شاخصه‌های اصلی پرکاربرد شدن چسب‌ها در صنعت فضایی شامل اتصال قوی مواد نامتشابه (پلیمر/فلز، کامپوزیت/فلز و غیره)، کاهش چشمگیر جرم ماهواره، قابلیت کاربری در دامنه دمایی گسترده (محدوده تغییرات دمایی تا ۱۸۰± درجه سانتی‌گراد) و دارا بودن همزمان چندین خاصیت (خواص چسبندگی، حرارتی و الکتریکی متناسب با کارایی فضاپیما) می‌باشد [۲-۱ و ۶-۵].

برای صنعت فضاپیماها، چسب در اتاق فرمان سازه‌ها (اتصال ورق‌های آلیاژ آلومینیمی و ساختارهای ساندویچ لانه‌زنبوری با چسب اپوکسی-فنلی) و در سپر حرارتی (چسب با جنس رزین نووالاک اپوکسی) بکار گرفته می شود. همچنین، در ساختار لانه‌زنبوری سازه از چسب‌ها برای پیوند هسته‌های لانه‌زنبوری به فولاد ضدزنگ استفاده می‌شود. به منظور مهروموم کردن اتصال‌دهنده‌های مکانیکی و درزها از چسب اپوکسی بهره گرفته می‌شود. در صفحات خورشیدی، اتصال پوسته‌های اپوکسی-شیشه به هسته لانه‌زنبوری آلومینیم و در سلول‌های خورشیدی برای اتصال فیلم نازکی از اپوکسی-شیشه به لمینیت پلی آمیدی چسب ها کاربرد پیدا کرده‌اند. در آینه‌های سطح دوم، صفحات شیشه‌ای شکننده یا صفحات کوارتزی با پشت فلزی روی فضاپیماها به‌وسیله چسب‌ها اتصال می‌یابند. در سطوح انعکاس تشعشعات در قسمت‌های خارجی فضاپیماها، تخته‌های مدار چندلایه، بازتابنده‌های آنتن و پنل‌های محافظ حرارتی نیز چسب‌ها بکار گرفته‌شده‌اند. به علاوه در شاتل فضایی، در هنگام اتصال کاشی‌ها برای محافظت از دما از چسب لاستیک سیلیکونی محیط پخت استفاده می‌شود که در طی ورودهای مجدد به جو، استحکام چسب برای نگهداری کاشی‌ها در دما به شدت بالا کافی است. در نهایت در صنایع موشکی، فناوری چسب برای بال‌ها، پیوند عایق‌ها، اتصال لاینر به سوخت جامد موتور محرک موشک و اتصال نازل به موتورهای پیشرانه استفاده می‌شود [۹-۷].

پر واضح است که یکی از خواص اصلی چسب‌های اتصال قطعات فضاپیماها، استحکام مکانیکی آن‌ها می‌باشد. اهمیت استحکام مکانیکی در دو محدودهٔ زمانی پرتاب اولیه و استقرار در مدار بسیار مشهود است. زمان پرتاب اولیه، قطعات فضاپیما در برابر فشارهای مختلف پرتاب، لرزش و صوت قرار می‌گیرند و در زمان استقرار در مدار، شوک‌های ناشی از بارهای اعمالی بر زیر مجموعه‌هایی مانند سلول‌های خورشیدی و آنتن‌ها مورد توجه است. همچنین، همزمانی چند ویژگی از عملکرد مطلوب چسب‌های سازه‌های فضایی محسوب می‌شود. به طور مثال، علاوه بر خواص اتصال‌دهندگی و استحکام مطلوب، برخی چسب‌ها حاوی مواد پرکننده رسانا به عنوان چسب‌های هادی الکتریکی کارایی دارند و در مقابل بعضی از آن‌ها به صورت روکش یا پوشش فرم گرفته با شکل قطعه به عنوان عایق الکتریکی محسوب می‌شوند (شکل **۲**).



شکل (۲): نمونه ای از چسب های بکار رفته بر قطعات الکترونیکی [۳].

هنگامی که چسب‌ها برای اتصال قطعات فعال حرارتی به عنوان مثال لوله‌های انتقال حرارت به کار می‌روند، هدایت حرارتی چسب تضمین بازده حرارتی سازه می‌باشد. همین مزیت در مونتاژ قطعات الکترونیکی نیز از دیگر محاسن بکار گیری چسب‌ها محسوب می‌شود. بدین ترتیب که چسب‌ها با خواص رسانای حرارتی و عایق الکتریکی به منظور اتلاف انرژی در قطعات الکتریکی و افزایش کارایی این سری از قطعات بکار گرفته می‌شوند. از دیگر ویژگی‌هایی که می توان برای چسب‌ها قایل بود، خصوصیت نوری و اپتیکال برخی از آن ها در سامانه‌های فضایی است. بطور مثال، در اتصال پوشش‌های سلول خورشیدی از چسب‌های شفاف استفاده می‌شود و ارزیابی میزان عبور نور از چسب به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در طراحی و تعیین ابعاد سلول‌های خورشیدی محسوب می‌شود.

لازم به ذکر است، چسب‌ها با قابلیت‌های منحصر به فرد بیان شده و حتی دارا بودن چندین ویژگی خاص بطور همزمان، لزوما در برنامه‌های فضایی مناسب محسوب نمی‌شوند. زیراکه ویژگی مهم چسب‌های فضایی، خروج گاز و مواد فرار از چسب‌ها در محدودهٔ استاندارد ESS فضایی (حدود ۱/۱ درصد کل وزن) است. چسب‌ها با قرارگرفتن در شرایط خلا ممکن است دچار خروج اجزای فرار شوند درحالیکه عدم خروج اجزای فرار محدودیت اصلی در مأموریت‌هایی فضایی محسوب می‌شود. اجزای خارج شده می‌توانند منجر به اختلال در عملکرد سازه‌ها به ویژه سازه‌های اپتیکی شوند که تخریب خصوصیات نوری آن‌ها و در نهایت کاهش عملکرد را به همراه دارد.

در کنار موارد عنوان شده با توجه به طولانی بودن ماموریت فضاپیماها، مدت زمان عملکرد چسب‌ها و عدم تغییر خواص به دلیل قرار گرفتن در معرض محیط فضایی (پرتوهای کیهانی و پرتوهای فرابنفش) در طول زمان کاربریِ فضاپیماها اهمیت دارد. شرایط سخت فضا مجموعه‌ای از محدودیت‌ها را برای فناوری‌های فضایی ایجاد می‌کند. در این میان یکی از نگرانی‌های اصلی در مورد طراحی سیستم فضایی، چسب‌های اتصالات است که برای نگه داشتن قطعات در کنار هم انتخاب شده است. از میان پلیمرهای بکار گرفته شده در تهیه چسب‌های سازه‌های فضایی، چسب‌های برپایه اپوکسی به دلیل دارا بودن خواص استحکامی بالا، سیلیکونی به دلیل مقاومت در محیط گرمایی، آکریلیکی به دلیل خواص نوری مناسب و پلی‌یورتانی به دلیل انعطاف‌پذیری دارای بیشترین کاربرد می‌باشند [۱۱-۱۰].

۲- انواع چسب از لحاظ ساختاری

چسب‌ها بر پایه ساختار شیمیایی خود به گروه‌های متعددی تقسیم‌بندی می‌شوند. هر نوع ساختار شیمیایی از چسب‌ها طیف وسیعی از خصوصیات را ارائه می‌دهد که با وجود ویژگی‌های منحصر به فرد خود، اغلب با یکدیگر همپوشانی دارند. رزین پایه در تعیین خواص اصلی چسب‌ها بسیار نقش مهم بازی می‌کند اما افزودنی‌ها با مقادیری کمتر از ۰/۰۱ درصد تا مقادیر بالای حدود ۴۰ درصد برای اصلاح ویژگی‌هایی مانند ارتقاء چسبندگی، کنترل انبساط حرارتی، سخت شدن، کنترل رئولوژیی، هدایت حرارتی/الکتریکی، کنترل پخت و غیره کاربرد بسیار دارند [۲ و ۱۲]. با وجود فرمولاسیون پیچیده چسب‌ها، خواص چسب هنوز توسط ساختار شیمیایی رزین پایه معرفی می‌شود. در ادامه به چهاردسته پرکاربرد و مهم چسب ها به همراه ویژگی‌ها، شرایط فرایندی و کاربرد آن‌ها اشاره شده است [۱۳].

چسب‌ها بر پایه اپوکسید: چسب‌های اپوکسی در حقیقت چسب‌های ترموست هستند که از واکنش بین رزین پلی اپوکسید و یک عامل پخت شونده اسیدی یا بازی تهیه می‌شوند. چسب‌های اپوکسی به طیف گسترده‌ای از مواد به‌خصوص فلزات، سرامیک، شیشه، بتن، پلاستیک‌های سخت و ترموپلاستیک‌ها اتصال می‌یابند [۱۱]. آن‌ها فراریت کم در حین پخت، جمع شدگی کم، مقاومت شیمیایی خوب به روغن‌ها، آب، اسیدهای رقیق، بازها و اکثر حلال‌ها را نشان می‌دهند. بنابراین، این دسته از چسب‌ها توانایی تشکیل اتصالات قوی و بادوامی را با اکثر مواد در یک طراحی خوب دارا می‌باشند [۱۴]. با توجه به ماهیت شیمیایی و سهولت واکنش پخت، اپوکسی‌ها می‌توانند انطباق پذیری قابل توجهی را در فرمولاسیون با تعداد زیادی از مواد افزودنی داشته باشند [۱۱]. فرمولاسیون آن‌ها موجب شده که استفاده از این چسب‌ها در بسیاری از صنایع به طرز چشمگیری افزایش یابد. نکته قابل توجه در این سری از چسب‌ها، مکانیسم پخت یکسان با وجود تغییرات متفاوت در فرمولاسیون است که در حقیقت به نسبت رزین به عامل پخت در فرمولاسیون وابسته می‌باشد.

چسب‌های اپوکسی به دو دسته دو جزیی و تک جزیی دسته‌بندی می‌شوند. برای اپوکسی‌های دو جزیی زمان پخت کامل در دمای محیط از چند دقیقه تا چند روز قابل تنظیم می‌باشد. لازم به ذکر است که تاکنون چند استثناء برای پخت در دمای زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد نیز تهیه شده است، اما در آن شرایط علاوه بر کاهش سرعت پخت میزان اتصالات بین شبکه‌ای نیز کاهش یافته که کاهش استحکام، مدول و مقاومت در برابر شرایط محیطی را در پی دارد. چسب‌های اپوکسی تک جزیی در حالت‌های مایع، خمیری و به فرم فیلمی در دسترس می‌باشند. این چسب‌ها برای پخت نیاز به حرارت دارند. در این سری از محصولات، رزین و پخت شونده پیش مخلوط شده و تا

زمانی که حرارت به آنها اعمال نشده پخت نمی‌شوند. در فرمولاسیون این نوع چسب کاتالیزور پخت طراحی شده که در دمای اتاق غیرفعال است و با افزایش دما (معمولاً بیش از ۱۰۰ درجه سانتی گراد) فعال شده و واکنش‌پذیری آغاز می‌شود. باید در نظر داشت که دمای بالاتر موجب افزایش سرعت واکنش می‌شود بطوریکه ممکن است زمان پخت به کمتر از ۱۰ دقیقه کاهش یابد. از لحاظ قابلیت کاربری گسترده این سری ار چسب‌ها در صنایع گوناگون بویژه در صنایع هواپیمایی می‌توان به استفاده آن‌ها در اتصال آلومینیم/آلومینیم، آلومینیم/به دیگر فلزات در پنل‌های فومی و لانه زنبوری، در مخازن سوخت پلی استر اصلاح شده با فیبر شیشه‌ای و در اتصال لاستیک سیلیکونی به فلزات اشاره کرد [۱۳].

چسب‌های پلی یورتانی: چسب‌های پلی یورتان به سه دسته پایه حلال، دیسپرشن های آبی و به فرم مخلوط تقسیم می شوند. دو روش فرایندی برای این دسته از چسب‌ها وجود دارد. می توانند براساس فرمولاسیون و واکنش شیمیایی خود، یک جزیی یا دو جزیی باشند. نوع یک جزیی در دمای اتاق پخت می‌شود که ممکن است کاتالیست به منظور کاهش زمان پخت به آن افزوده شود. در سامانه دو جزیی، پلیمریزاسیون به وسیله افزایش کاتالیست انجام می شود. از نظر شرایط فرایندی، چسب یک جزیی حاوی حلال با استفاده از خشک شدن و در نوع بدون حلال به عنوان چسب های گرما ذوب در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد با تجهیزات مخصوص پوشش غلتکی استفاده می شوند [۱۳].

برای این دسته از چسب ها طیف وسیعی از ویسکوزیته و فرمولاسیون با درجه های مختلف بلورینگی وابسته به ساختار پیش پلیمر (نسبت وزن مولکولی پلی استر به کل وزن یورتان) قابل دسترس است. همچنین، مقاومت بالا در برابر ضربه، مقاومت عالی در دماهای پایین، دوام در محیط های رطوبت و پایداری گرمایی یورتان‌ها به بسیاری از چسب ها برتری دارد. از جهت کاربری، پلی یورتان ها در اتصالات پلاستیک‌های تقویت شده با شیشه، شیشهٔ اتومبیل، لمینیت پنل های عایق و مواد بسته‌بندی قابل‌انعطاف کاربرد گسترده پیدا کرده‌اند. در صنایع فضایی چسب‌های پلی یورتان علاوه بر درزگیری دارای بیشترین کاربرد در اتصال و پوشش دهی قطعات الکتریکی بطور همزمان هستند که همین امر سبب می‌شود علاوه بر خواص چسبندگی خواص عایق الکتریکی را نیز داشته باشند [۱۳].

چسب‌های آکریلیکی: رزین‌های ترموپلاستیک بر پایهٔ آکریلات و مشتقات آن (آمیدها و استرها)، طیف گسترده ای از انواع چسب‌ها را تشکیل می‌دهند. چسب‌های آکریلیکی به طور معمول به فرم‌های امولسیون، محلول یا مخلوط‌های پلیمری (یک یا دو جزء) در حضور کاتالیزورها (مایع یا پودر) موجود هستند. همچنین، به فرم مایع تک جزیی با روش پخت با پرتو فرابنفش در دسترس می باشند. نوع دیگری از این سری به عنوان آکریلیک‌های بی هوازی به فرم جامد و بدون حلال نیز وجود دارند. چسب‌های آکریلیکی جزئی چسب‌هایی هستند که دامنه مقاومت گسترده در برابر هوا و رطوبت محیط را دارا می‌باشند. به عنوان مثال، برای انواع محلولی مقاومت محیطی ضعیف تا مقاومت محیطی عالی را می‌توان در این سری از چسب‌ها تنظیم کرد. اسیدهای غیر اکسیدکننده، اسپری نمک و سوخت‌های نفتی بر این دسته از چسب ها تأثیر گذار نمیجباشند، اما از الکلجها، حلال‌های قوی و هیدروکربن‌ها (معطر و کلردار) تأثیرپذیری زیادی خواهند داشت. به علاوه محدوده دمای سرویس دهی چسب‌های آکریلیکی برپایه مونومر متاکریلات از ۶۰- تا ۵۲ درجه سانتی‌گراد و برای سامانه‌های بر پایه استرهای متاکریلات تا محدوده ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بیان شده است. کاربرد این چسب‌ها را می‌توان در اتصال سازه‌های سبک آکریلیکی به چوب، شیشه، فلزات، لاستیک، چرم و پارچه، وسایل تزئینی و کاربردی بیرونی مانند روکش پلاستیکی، ورقه‌های آلومینیمی، صفحات شیشه‌ای، عدسی‌ها و اجزای اپتیکی در صنعت هوا فضا، دریایی و خودرو برشمرد [۱۳].

چسب‌های سیلیکونی: سیلیکون‌ها پلیمرهای نیمه معدنی هستند که می‌توانند بر اساس نوع گروه‌های آلی روی اتم‌های سیلیکون و میزان شبکه‌ای شدن ساختار پلیمری آن ها به فرم‌های مایع، الاستومری یا رزین باشند. استفاده از سیلیکون‌ها به عنوان چسب در سال‌های اخیر گسترش یافته است و به طور زیاد برای کاربردهای خاص توسعه یافته‌اند. چسب‌های سیلیکونی استحکام بالایی ندارند، اما برای انعطاف‌پذیری و توانایی عملکرد در طیف وسیعی از دماها (از دماهای بحرانی خیلی پایین تا بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) به کار می روند. همچنین، این چسب‌ها مقاومت چسبندگی اولیه کم دارند. علاوه بر این، سیلیکون‌ها می‌توانند برای بهبود خواص حرارتی دیگر چسب‌ها مانند رزین‌های اپوکسی و فنلی بکار گرفته شوند. این گونه چسب‌ها تنوع گوناگون دارند. در حالت حساس به فشار با خشک شدن حلال به مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه در دمای ۷۰ الی۱۰۰ درجه سانتی‌گراد چسبندگی آن‌ها کامل می‌شود. برای حالت فیلمی، چسبندگی در برخی موارد بدون نیاز به بهبود سطح انجام می‌شود، اما برای بعضی نوع

های دیگر نیاز به یک پرایمر برای جلوگیری از مهاجرت چسب به سطح وجود دارد. در نوع دیگری، به پخت ثانویه در مدت ۵ دقیقه تحت دمای ۱۲۵ یا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بر اساس فرمولاسیون زمان نیاز دارد. ممکن است کاتالیزور پراکساید یا سرب اکتات به میزان ۲ درصد وزنی اضافه شود تا تعادل مطلوبی بین استحکام، سختی و چسبندگی را سبب شود [۱۳].

چسب‌های سلیکونی در حالت‌های یک جزیی و دو جزیی موجود می‌باشند. حالت دو جزیی آن مشابه دیگر سامانه‌های دو جزیی از قبیل اپوکسی‌ها و آکریلیک‌ها است و نوع تک جزیی آن مشابه پلی‌یورتان های تک جزیی به روش نفوذ رطوبت جو پخت می‌شود. از جهت پایداری، چسب‌های سیلیکونی مقاومت خوبی در برابر رطوبت، هوای آزاد، نور خورشید، ازون و در نهایت پیرشدگی طبیعی دارند. همچنین، مقاومت حرارتی و اکسیداسیون آن ها نیز بسیار عالی است بطوریکه دمای سرویس‌دهی آن ها از ۶۰- تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. رزین‌های سیلیکون در مقابل بسیاری از روغن‌ها و مواد شیمیایی ازجمله اسیدها و بازهای رقیق مقاوم هستند، اما در حلال آلی مستعد انحلال‌پذیری می باشند. خواص الکتریکی خوب با استحکام دی الکتریک بالا و ضریب اتلاف کم برای آن ها مشاهده می شود و همچنین تجزیه پذیری بسیار کم دارند. کاربرد چسب‌های سیلیکونی را در تولید چسب‌های حساس به فشار نواری برای اتصالات موادی بر پایه لاستیک‌های سیلیکونی، فیلم‌های پلی‌استر، پلی اتیل فلوئور و اتیلن، فویل فلزی و در بسیاری از محصولات الکتریکی (سیم‌پیچ‌های الکتریکی و کویل ها) می توان مشاهده کرد. در حقیقت از مقاومت دمایی بالا و انعطاف‌پذیری عالی این چسب‌ها نهایت بهره‌برداری می‌شود [۱۳].

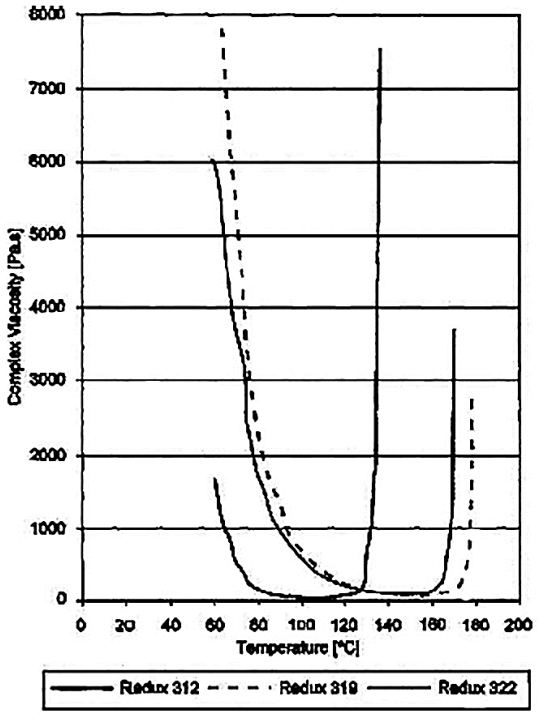
۳- اشکال مختلف کاربرد چسب‌های سازه‌های فضایی

از اساس تمام چسب‌های سازه‌های فضایی در سه شکل اصلی زیر ارائه می شوند [۱۵]:

چسب‌های پایه حلالی (پرایمری): به طور معمول سیستم‌های تک جزئی هستند که مواد پلیمری در محیط‌های مایع یا محلول پخش می‌شوند و ممکن است چسب ها پایه آبی نیز باشند. در کاربردهای هوافضا، این نوع از چسب‌ها بطور متداول به عنوان محافظ قطعات، محافظ سطوح و بازدارنده خوردگی کاربرد دارند.

چسب‌های خمیری: در اصل سیستم‌های تک جزئی یا دو جزئی فاقد حلال هستند. حالت فیزیکی آن ها می‌تواند مایعات با ویسکوزیته متوسط و قابل کاربرد به صورت تزریقی یا خمیری با ویسکوزیته نسبتا زیاد و تیکسوتروپیک را شامل شوند. چسب‌های با جرم مولکولی کم و چسب‌های فومی همگی در این گروه قرار می‌گیرند.

چسب‌های فیلمی: این گروه از چسب‌ها همانند فویل تهیه می‌شوند و می‌توانند به شکل و اندازه ناحیه اتصالی برش یابند. در حقیقت این دسته در دمای اتاق جامد هستند و با افزایش دما مایع می‌شوند. البته اتصالات شبکه کننده تشکیل نمی‌دهند. بنابراین، با گرم شدن ابتدا ذوب و سپس جریان می‌یابند تا لایه زیرآیند اتصال را خیس کنند و در نهایت در دماهای بالاتر پخت شده و به یک ماده جامد غیرقابل نفوذ تبدیل می شوند. روند جاری شدن آن ها را با بررسی ردیابی ویسکوزیته برای سه چسب فیلمی را می‌توان در شکل **۳** مشاهده کرد.



شکل (۳): روند تغییرات ویسکوزیته برای سه نوع چسب فیلمی [۱۵].

۴- روش‌های تولید چسب‌های صنعت فضایی

در تولید چسب‌های صنعت فضایی، گاهی تجهیزات ویژه و منحصر به فردی به منظور تولید بکارگرفته نمی‌شود بلکه

فرمولاسیون آن هاست که محصولات را خاص و ویژه می‌کند [۱۵].

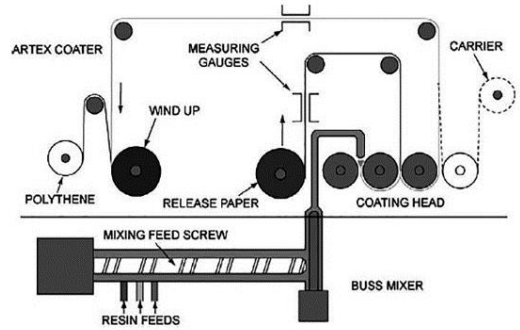
تولید چسب‌های پرایمری: تولید این دسته از چسب‌ها به تجهیزات نسبتاً ساده‌تری نیاز دارد. برای تولید چسب‌های پرایمری پایه حلالی ظروف ساده اولیه شیشه‌ای، فولادی ضدزنگ و حتی فولادها با خواص متوسط به همراه یک همزن که به سیستم گرمایشی داخلی یا خارجی و درصورت لزوم به کندانسورهای خنک کننده با آب مجهز است کفایت می‌کند. در تولید چسب‌های پرایمرهای پایه آبی استفاده از ظروف با جنس فولاد با کیفیت متوسط اصولا استفاده نمی‌شود. از آنجاکه، مواد جامد اولیه باید به صورت محلول یا دیسپرس درآیند، بنابراین این امر به طور غالب با استفاده از آسیاب مهره ای حاصل می‌شود. البته قابل ذکر است اندازه مهره، حجم مهره برای آسیاب کردن، دما، محتوای جامدات، pH و غیره در تهیه چسب باید بهینه شوند.

چسب خمیری: روش کلی تولید چسب‌های خمیری در واقع ساده است. به طور کلی، چسب‌های خمیری تک جزئی و دو جزئی می‌توانند در ظروف اختلاط با جنس‌های متفاوت بدون نیاز به کندانسور و به طور معمول بدون نیاز به حرارت ساخته شوند. البته زمان استفاده از مواد تشکیل دهنده خورنده به ظروف استیل ضدزنگ یا ظروف با روکش شیشه احتیاج می شود. در تهیه خمیرها با ویسکوزیته پایین به طور معمول از همزن‌های ساده برای پراکندگی مواد اولیه استفاده می‌شود. در حالیکه برای تولید خمیرها با ویسکوزیته بالاتر نیاز به استفاده از همزن‌های با سرعت برش بالاتر و گاهی تیغه ای خاص می‌باشد. به منظور پخش پودرها، مواد معدنی، مواد پرکننده و غیره در بستر اصلی پلیمر مایع یا رزین از آسیاب های دو رول معمولی استفاده می‌شود. قابل ذکر است گاهی تکنیک‌های دیگری مانند مخلوط کردن در خلا یا تحت نیتروژن ممکن است ضرورت پیدا کند.

چسب فیلمی: دو روش برای تولید چسب‌های فیلمی به روش محلولی یا مذابی وجود دارد. در حالت اول، ابتدا فیلم ریخته‌گری و سپس حلال خارج می‌شود. در حالت دوم، چون هیچ حلالی برای حذف وجود ندارد، بنابراین ابتدا ماتریس ذوب و سپس ریخته گری می‌شود. این روش تهیه فیلم موسوم به «گرماذوب» است. مرحله اولیه در هر صورت تولید ماتریس به طور کامل فرموله شده است. در سیستم مبتنی بر حلال می‌توان از تجهیزات مشابه تولید پرایمرها استفاده شود و در سیستم گرما ذوب از روش چسب‌های خمیری با ویسکوزیته بالا بکارگرفته می‌شود با این تفاوت که قابلیت گرمایش و سپس خنک سازی ماتریس در حین چرخه اختلاط مورد نیاز است.

ریخته‌گری فیلم به طور اساسی دو رویه متفاوت دارد. هنگام تهیه فیلم از ماتریس‌های حلالی از روش بکارگیری رول کردن معکوس و اعمال یک فیلم پیوسته بر پشت لایه‌ای مشابه کاغذ استفاده می‌شود و نهایتا چسب از داخل کوره با تنظیم دمایی بسیار حساس و گردش هوایی منظم عبور می‌کند. تنظیمات کوره به نحوی انجام می شود که تبخیر حلال به چروک یا تاول‌زدن فیلم نهایی منجر نشود (شکل **۴**).

در روش گرماذوب این امکان وجود دارد که اختلاط و ریخته‌گری فیلم بطور پیوسته انجام شود. اکسترودر پیچ معمولی[1] با مواد خام اولیه تغذیه می‌شود و تحت شرایط کنترل دمایی اختلاط انجام شده و سپس به دستگاه رول کردن معکوس[2] پمپ می‌شود. به این ترتیت می‌توان چسب‌های فیلمی از حد ۵۰ تا حدود ۱۸۰۰ گرم بر متر مربع تولید شود. نمایش شماتیک فرآیند این دو نوع چسب در شکل **۴** نشان داده شده است.



شکل (۴): شماتیکی از فرایند تولید چسب های گرما ذوب [۱۵].

۵- روش‌های اعمال چسب بر سازه‌های فضایی

در این صنعت علاوه بر ویژگی‌های چسب، نحوه اعمال آن نیز از اهمیت خاصی برخوردار است بنابراین مسیر فرایند اعمال به وسیله متخصصین یا ربات‌ها بسیار دقیق کنترل می‌شود [۱۶-۱۵].

1. Conventional Screw Extruder
2. Reverse-roll Coating Machine

اعمال چسب پرایمری: این نوع چسب‌ها به منظور اعمال بر قطعات کوچک به وسیله برس و در قطعات متوسط با استفاده از غلتک بر سطوح پوشانده می‌شوند. در قطعات خیلی بزرگ که عموماً در صنعت هوافضا در این ابعاد هستند پوشش سطوح به روش اسپری توصیه می‌شود. قابل بیان است برای پوشش با اسپری به طور معمول از تکنیک حجم بالا-فشار کم یا حجم کم-فشار زیاد بوسیله ربات استفاده می شود. همچنین، باید گفته شود بسته به کاربرد و نوع پرایمر سطوح پوشش داده شده را می توان در حالت خشک شده ذخیره کرد یا به طور دقیق قبل از چسباندن لایه بعدی اعمال و بلافاصله بکار گرفت.

اعمال چسب خمیری: برای استفاده از این دسته از چسب‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. روش انتخاب شده اغلب به مولفه‌های اتصال (اندازه و پیچیدگی شکل قطعه) و ویسکوزیته چسب بستگی دارد. مستقل از ویسکوزیته چسب نهایی، اعمال این چسب‌ها با بکارگیری کفگیرک، پالت یا ماله بسیار متداول است. با این وجود برای چسب‌هایی با ویسکوزیته کم، اعمال مواد بر سطوح با استفاده از پاشنده‌های تفنگی میسر شده که اغلب از طریق ربات کنترل می‌شوند.

برای چسب‌های با ویسکوزیته بالاتر بکارگیری اعمال‌کننده‌های رولی اتوماتیک پیشنهاد می‌شود. بدین ترتیب که چسب به داخل غلتک پمپ می‌شود و بستر یا قطعه‌ای که باید روکش شود از بین غلتک حاوی چسب و غلتک نگهدارنده عبور داده می‌شود. بدین ترتیب یک پوشش با ضخامت یکسان و یکنواخت از چسب بر روی قطعه اعمال می‌شود.

اعمال چسب فیلمی: چسب‌های فیلمی ساده‌ترین روش اتصال چسب به زیرآیند محسوب می‌شوند. برای سازه‌ها فضایی با اشکال ساده، چسب‌های فیلمی را می‌توان توسط تأمین کننده چسب به نوارهایی با عرض مورد نظر تهیه و سپس با دست یا ربات روی قطعه اعمال کرد. برای قطعات بزرگ از دستگاه‌های اعمال چسب استفاده می‌شود. البته تهیه فیلم در هندسه صحیح و دقیق برای موقعیت مد نظر به وسیله دست یا روبات نیز مقدور است. قابل بیان است که اتصال و چسبندگی چسب‌های فیلمی بسیار کنترل شده باید انجام شود، بدین معنی که پایداری و استحکام فیلم به حدی باشد که از جایگزینی مجدد فیلم جلوگیری نکند.

۶- بررسی تأثیر محیط فضا بر چسب‌ها

محیط فضایی، محیطی به طور کامل متفاوت از اتمسفر و شرایط زمین است. بنابراین، عواملی به طور کامل متفاوت از جو زمین بر فضاپیماها تأثیرگذار هستند که می‌توانند منجر به تخریب اجزای آن ها شوند. به منظور شناخت بهتر فضا و به تبع آن کنترل کیفیت اجزای فضاپیماها و ارزیابی صحیح از تأثیرات بالقوه محیط فضایی بر آن ها نیاز به شناخت اجزای اصلی محیط فضایی است. شهاب سنگ‌ها و بقایای آن ها، پرتوهای کیهانی کهکشانی[1] ذرات پر انرژی خورشیدی[2] بادهای خورشیدی و اکسیژن اتمی[3] از جمله اجزای اصلی محیط فضایی هستند.

به جز اجرام باقی مانده در فضا و میکرو شهاب سنگ‌ها که در اثر برخورد با فضاپیماها به آن ها خسارت وارد می کنند. سایر عوامل تأثیرگذار محیط فضایی به عنوان عامل کهولت معرفی می‌شوند. زیرا این عوامل منجر به تخریب تدریجی فضاپیماها در مدت زمان مأموریت می‌شوند و گاهی اثر تجمعی این عوامل، سرعت تخریب را افزایش می‌دهد که در ذیل نگاهی مختصر و گذارا به اجزای محیط فضایی شده است.

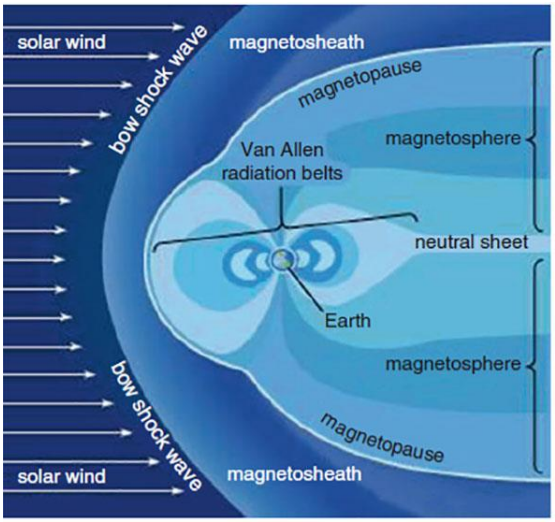
پرتوهای کیهانی، ذرات پر انرژی خورشیدی و بادهای خورشیدی، جز ذرات باردار پرانرژی در فضای بین سیاره‌ای و در مغناطیس کره‌های ماه یا سیارات محسوب می شوند که منشا تولید این ذرات پرانرژی و میزان انرژی آن‌ها و درصد تاثیر گذاری آن‌ها بر سامانه‌های فضایی مختلف است که ویژگی آنها عبارتند از:

- سری اول: ذرات پرانرژی پرتوهای کیهانی که از فضای میان ستاره‌ها وارد منظومه خورشیدی می‌شوند. آن ها از پروتون‌ها، الکترون‌ها و هسته‌های به طور کامل یونیزه، تشکیل شده‌اند و انرژیی در حدود گیگا و ترا الکترون ولت (GeV تا TeV) دارند.
- سری دوم: ذرات پر انرژی خورشیدی نامیده می‌شوند که از شعله‌های خورشید یا امواج شوک مرتبط با بیرون راندن جرم تاج خورشیدی ناشی می‌شوند. آن ها شامل پروتون ها، الکترون‌ها و یون‌های سنگین با محدوده انرژیی حدود چندین ده کیلو تا چندین گیگا الکترون ولت را دارا می‌باشند.
- سری سوم: به نام بادهای خورشیدی معروف هستند که از

1. Galactic Cosmic Rays (GCR)
2. Solar Energetic Particles (SEP)
3. Atomic Oxygen (ATOX)

اتمسفر خارجی خورشید نشات می‌گیرند و به سمت بیرون گسترش می‌یابند. این ذرات به طور عمده از پروتون، الکترون و آلفا با دامنه انرژی بین چند الکترون تا چندین کیلو الکترون ولت تشکیل شده‌اند.

اگرچه انرژیِ پرتوهای کیهانی و ذرات پرانرژی خورشیدی بسیار بیشتر از انرژی بادهای خورشیدی و ذرات درون کمربندهای تابشی است، اما شار آن ها به طور نسبی کم‌تر می باشد. بنابراین، سهم آن‌ها در تخریب فضاپیماها کمتر در نظر گرفته می‌شود. البته قابل بیان است این نوع از تشعشعات (اشعه های کیهانی و ذرات پرانرژی خورشیدی) یکی از نگران کننده‌های اصلی به دلیل تأثیر گذاری بر عملکرد سازه‌های الکتریکی محسوب می شوند. زیرا آنجها می‌توانند با ایجاد القاهای الکتریکی منجر به اختلال در عملکرد یا حتی از کارافتادگی قطعات الکتریکی شوند. البته میدان‌های ژئومغناطیسی سیارات یا قمرها بر ذرات پر انرژی (فعال) تأثیر می‌گذارند و همچنین می‌توانند محیط تابشی خاصی ایجاد کنند. در حقیقت، ذرات فعال که از محیط بین سیاره‌ای به دست می‌آیند در این میدان ژئومغناطیسی محبوس می‌شوند و بسته به قطبیت آن ها در امتداد خطوط میدان شتاب می‌گیرند. بنابراین، کمربندهای تابشی در اطراف سیارات یا قمرها ایجاد می‌شوند. به طور مثال، کمربندهای تابشی اطراف زمین که به کمربندهای ون آلن معروف هستند از شعاع ۱۰۰ تا ۶۵۰۰۰ کیلومتری اطراف زمین امتداد پیدا می‌کنند و به طور عمده از پروتون با انرژی صدها مگا الکترون ولت و الکترون با انرژی چند مگا الکترون ولت ناشی از باد خورشیدی تشکیل شده‌اند (شکل ۵).

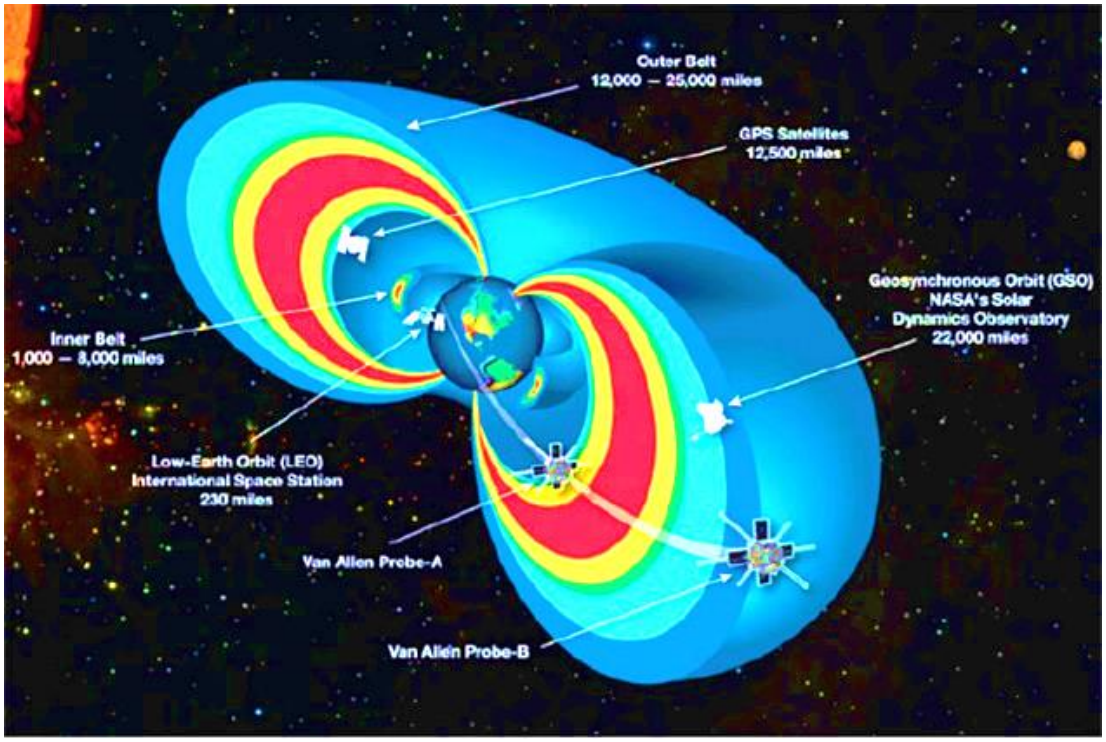


شکل (۵): تصویر کمربند تابشی اطراف زمین [۳].

ماهواره بسته به مدار خود (مدار پایینی زمین یا لئو[1]، مدار میانی یا مئو[2] و مدار زمین آهنگ یا ژئو[3]) در معرض میزان متفاوتی از جریان و انرژی ذرات پرانرژی موجود در کمربندهای ون آلن[4] مواجه می شود. به عنوان مثال، در مأموریت‌های مدار لئو که مشخصه آن قرارگیری فضاپیماها در ارتفاع زیر ۱۰۰۰ کیلومتر است، نسبت کمی از ذرات پرانرژی به این مدار ارسال می‌شود. درحالیکه در مأموریت-های ژئو و جی پی اس (GPS و GEO) سفینه‌ها تحت میزان بسیار بالایی از شار ذرات پرانرژی قرار دارند. علاوه بر آن در مدار ژئو، جریان بزرگی از ذرات کم انرژی نیز مشاهده می‌شود که با وجود انرژی کم به دلیل حجم بالای برخورد آن ها بر اجزای خارجی ماهواره، تأثیرگذاری قابل توجهی دارند. باید خاطر نشان کرد، در مأموریت‌های بین سیاره‌ای ماهواره‌ها با محیط‌های تابشی متفاوتی مواجه می‌شوند. در حقیقت در طول مرحله گشت‌زنی بین سیارات (به طور مثال در مأموریت جووین[5])، نه تنها به بادهای خورشیدی متفاوت بلکه با کمربندهای تابشی آن سیارات (مشتری و قمرهای آن) برخورد دارند. همچنین، در ماموریت‌ها به سمت خورشید فضاپیماها محیط فضایی دیگری را تجربه می‌کنند. بدین روش که کاوشگرها در معرض شار بالا از ذرات باد خورشیدی با دمای بالا قرار می‌گیرند که به اثرات هم افزایی بالقوه‌ای در جهت تخریب قطعات منجر می‌شود (شکل ۶).

یکی دیگر از اجزای محیط فضایی که از علل مهم تخریب سفینه‌ها محسوب می‌شود، اکسیژن اتمی است. این اتم‌ها در طی تجزیه نوری مولکول‌های اکسیژنِ اتمسفر توسط تابش الکترومغناطیسی خورشید (با طول موج (λ) کوتاهتر از ۲۴۳ نانومتر) تولید می‌شوند که در حقیقت ناشی از شکستن پیوندهای کوالانسی مولکول اکسیژن است. این اتم‌ها با دارا بودن یک الکترون فعال بسیار اکتیو بوده و می‌توانند از طریق مکانیسم اکسیداسیون رادیکالی برهمکنش ایجاد کنند و در نهایت موجب تخریب یا اختلال در عملکرد شود. قابل ذکر است که بیشترین اکسیژن اتمی در اطراف جو زمین اثبات شده است اما وجود آن در برخی از محیط‌های سیاره‌ای دیگر مانند مدار مریخ نیز تولید شود [۱۷-۱۸].

1. Low Earth Orbit (LEO)
2. Medium Earth Orbit (MEO)
3. Geostationary Orbit (GEO)
4. Van Allen Belts
5. Jovian Missions



شکل (۶): کمربندهای تابشی مدارهای مختلف موثر بر ماهواره‌ها [۳].

۷- مکانیسم تخریب در فضا

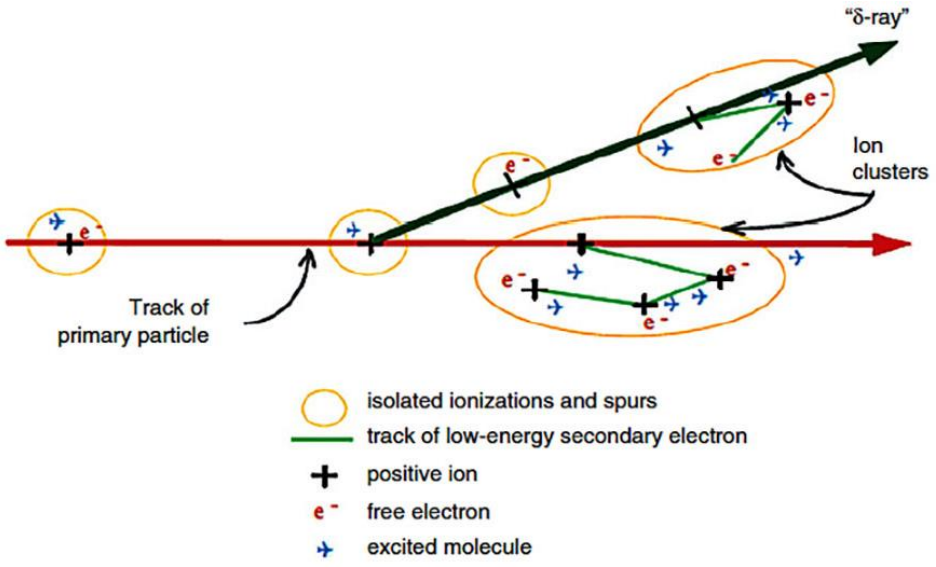
ذرات باردار (الکترون‌ها، پروتون‌ها و یون‌های سنگین) و فوتون‌های UV که انرژی آن‌ها (از یک کیلو ولت تا چندین مگاولت) برای تحریک و یونیزه کردن مولکول‌ها کافی می‌باشد ممکن است برای یونیزه کردن پلیمرها (به غیر از پرتوهای UV بسیار دور) کافی نباشد. در حقیقت، یونیزاسیون زمانی اتفاق می‌افتد که میزان انرژی ذرات باردار برای غلبه بر انرژی اتصال الکترون‌ها در اتم‌ها یا مولکول‌ها کافی باشد و سبب جدایش و ایجاد یون شود. تحریک زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی ذره برای یونیزه کردن مولکول‌ها کافی نباشد، بنابراین می‌تواند با تحریک مولکول و انتقال الکترون از یک حالت پایه به یک حالت برانگیخته، حالت‌های حدواسط الکترونی (اتم‌های رادیکالی) ایجاد کند. از این‌رو، اثرات پرتوهای فرابنفش، ذرات باردار (اجزای محیط فضایی) و اکسیژن اتمی با توجه به میزان انرژی، مکانیسم تغییر و تخریب پلیمرها و از جمله چسب‌ها می‌تواند متفاوت باشد.

تأثیر پرتوهای فرابنفش: در محیط فضایی، طیف الکترومغناطیسی خورشیدی با طول موج‌های 10^{-4} تا 10^{4} میکرومتر و یک توزیعی نزدیک به توزیع تابشی از جسم سیاه وجود دارد. بنابراین، در طی برهم‌کنشی از یک فوتون با یک اتم یا یک مولکول از ماده فوتون می‌تواند جذب یا با اتلاف احتمالی انرژی منتشر شود. پرتوهای فرابنفش، با طول موج‌های کمتر از ۰/۴ میکرومتر و شار انرژی در حدود $118 Wm^{-2}$ موجب تغییر و گاهی تخریب مواد می‌شود که برای طول موج پرتوهای فرابنفش دو پدیده را می توان انتظار داشت. برای طول موج بین ۰/۲ تا ۰/۴ میکرومتر ($0.2<\lambda<0.4\ \mu m$) باید انتظار برانگیختگی مولکول‌ها را داشت، از آنجاکه انرژی فوتون‌های ماورابنفش در محدوده ۳/۱ و ۶/۲ الکترون ولت به ترتیب برای طول موج‌های ۰/۴ و ۰/۲ میکرومتر است. این انرژی برای یونیزه کردن مولکول‌ها کافی نیست و می تواند در حد برانگیختگی مولکول‌ها از این پرتوها توقع داشت. برای طول موج کمتر از ۰/۲ میکرومتر ($\lambda < 0.2\mu m$) انرژی فوتون‌ها برای یونیزه کردن مولکول‌ها کافی می باشد. بنابراین، منجر به جدایش یا اتصالات شبکه‌ای کننده در زنجیره های پلیمری می‌شود. این اثرات فتوشیمیایی ممکن است منجر به تغییر رنگ ماده و از بین رفتن خصوصیات مکانیکی شود.

تأثیر ذرات باردار: انرژی ذرات باردار در محیط فضایی به طور معمول بین یک الکترن ولت و چندمگا الکترون ولت می باشد که اتم‌ها و مولکول‌های مسیر خود را می‌تواند تحریک یا یونیزه کند. در شرایط یونیزاسیون، الکترون ثانویه در طی فعل و انفعال اولیه بین ذره باردار و ماده آزاد می‌شود. اگر انرژی کافی داشته باشد می‌تواند از محل برهمکنش اولیه خارج شده و در طول مسیر خود تحریکات و یونیزاسیون‌های جدید ایجاد کند

[۱۹]. بنابراین، ذرات باردار مسئول تغییر شیمیایی مواد محسوب می‌شوند (شکل **۷**). اگر الکترون ثانویه به اندازه کافی انرژی نداشته باشد، می‌تواند توسط یون مادر دوباره جذب شود و یک مولکول برانگیخته یا یک رادیکال آزاد ایجاد نماید. یک رادیکال آزاد می‌تواند با مواد ترکیب شده و مواد آغازگر را تشکیل دهد یا می‌تواند در اطراف محل برهمکنش‌ها منجر به تشکیل محصولات شیمیایی جدید شود. این امر می‌تواند از نظر جنبه‌های آلودگی بسیار مهم باشد. چراکه مواد خروجی ممکن است سبب اختلال در روند کارکرد نزدیکترین ابزار (مانند تلسکوپ) شود. به همین علت، گازهای خروجی از مواد در برنامه‌های فضایی شدیدا کنترل می‌شوند. در نتیجه، اگر در نظر بگیریم که ماهیت گونه‌های ایجاد شده فقط به برهمکنش با الکترون‌های ثانویه بستگی دارد. بنابراین، این ماهیت از تابش مستقل می‌باشد. برعکس، توزیع فضایی گونه‌های ایجاد شده به تابش بستگی خواهد داشت. علاوه بر این، اختلاف جرم بین الکترون‌ها و پروتون‌ها باعث ایجاد قدرت متوقف‌کننده متفاوت و عمق نفوذ متفاوت در ماده می‌شود. در مورد ذرات باردار، به طور کلی تخریب تابعی از مقدار واسطه‌های واکنشی (مولکول‌های برانگیخته، رادیکال‌های آزاد و غیره) و تابعی از دوز انرژی جذب شده در مواد می‌باشد.

اکسیژن اتمی: اکسیژن اتمی می تواند با پلیمرها، کربن و بسیاری از فلزات واکنش داده و باندهای اکسیژنی با اتم‌های سطحی ایجاد کند. در این راستا، حذف هیدروژن، جذب اکسیژن یا اتصال اکسیژن در محل باندهای دوگانه ممکن است رخ دهد که با ادامه قرار گرفتن در معرض اکسیژن اتمی، در نهایت منجر به محصولات اکسیداسیون فرار شود. این امر منجر به فرسایش تدریجی ماده هیدروکربن یا هالوکربن می‌شود. از میان مواد پلیمری مورد استفاده در فضاپیماها که با قرار گرفتن در معرض اکسیژن اتمی فرسایش می‌یابند، مواد سیلیکونی یک استثنا می باشند. این خانواده از مواد پلیمری با قرارگرفتن در معرض اکسیژن اتمی به راحتی تخریب نمی‌شوند. این سری از خانواده پلیمرها با قرار گرفتن در معرض اکسیژن اتمی و انجام واکنش‌های اکسیداسیون، سطح آنها اکسید شده و به لایه سطحی مبتنی بر سیلیس سخت تبدیل می‌شوند که در برابر فرسایش اکسیژن اتمی مقاوم هستند. اثرات ATOX می‌توانند روی مواد فضایی مهم باشند و بنابراین شناختن آن ها مهم می باشد. اما از آنجا که چسب‌ها در معرض مستقیم اکسیژن اتمی نیستند، احتمال تأثیر گذاری این عامل محیط فضایی بر آنها بسیار کم است.

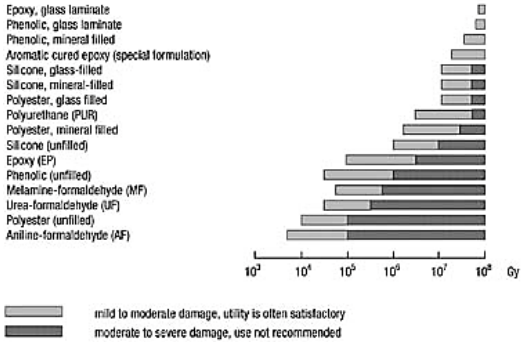


شکل (۷): توزیع یون ها و مولکول‌های برانگیخته در مسیر حرکت الکترون سریع [۱۹].

۸- اثرات محیط بر خواص گوناگون چسب‌ها

شرایط فضا مجموعه‌ای از محدودیت‌ها را بر فناوری‌های سامانه‌های فضایی تحمیل می‌کند. در فاصله دور از لایه‌های عایق اتمسفر اطراف زمین در محیط خلا، دما می‌تواند به منفی ۲۰۰ درجه فارنهایت در مکان‌های سایه (بدور از نور خورشید) و تا مثبت ۲۰۰ درجه فارنهایت در هنگام مواجهه با خورشید برسد. بنابراین، یکی از این ملاحظات که در ابتدا ممکن است با اهمیت به نظر نرسد اما در صورت عدم توجه کافی می‌تواند منجر به نتایج فاجعه‌آمیز شود، اتصال چسبی و استحکام

چسب‌های بین قطعات است. اصولاً در مهندسی مواد هوافضا، چسب‌های پلیمری با مقاومت در برابر درجه حرارتی بالا و با درجه خوبی از انعطاف‌پذیری در دماهای بسیار پایین (که اکثر مواد در آن دما سفت و شکننده می‌شوند) انتخاب می‌شوند. اما به هر حال تمام پلیمرها به دلیل عدم وجود گازهای جوی در فضا که مانعی در مسیر مواجه امواج الکترومغناطیسی و ذرات است، مستعد تاثیر پذیری از تشعشعات موجود در فضا هستند. تشعشعات می‌تواند باعث تغییراتی در خواص الاستیکی چسب‌ها، مشابه خواص ناشی از پیری شوند [۲۰]. مقایسه‌ای بین پلیمرهای مختلف با میزان درصد تاثیرپذیری از تشعشات فضایی در شکل **۸** آورده شده است.

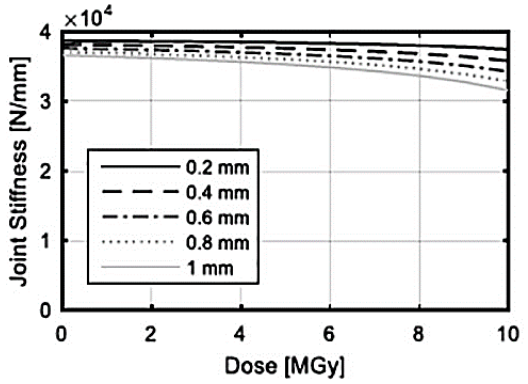


شکل (۸): مقایسه میزان مقاومت تابشی مواد پلیمری مختلف در محیط فضا [۲۰].

تغییرات میزان چسبندگی: خواص چسبندگی (استحکام برشی[۱]) یکی از پارامترهای حساس به تشعشع است. بررسی ریزساختاری چسب‌ها نشان می‌دهد که بطور متداول چسبندگی سطحی در اتصالات قوی است و مکانیسم شکست در چسب‌ها ترکیبی از شکستگی رزین و جداشدگی از سطحی می‌باشد. اما در حضور تشعشات فضایی میزان و سرعت این مکانیسم ها به شدت افزایش می‌یابد که منجر به کاهش قابل‌توجه در استحکام شکست می‌شود. البته قابل ذکر است گاهی در دوزهای تابش کم (کمتر از ۵ MGy)، چسب‌ها افزایش استحکام چسبندگی را نشان می‌دهند. درحالی‌که در دوز تابش شدید بریدگی زنجیره‌های پلیمری شروع به غالب شدن می‌کند. به طور کلی، فرآیند بریدگی زنجیره‌ای با کاهش چگالی اتصال عرضی و تشکیل محصولات مولکولی همراه می‌شود که کاهش استحکام را به همراه دارد.

مطالعه‌ای به بررسی اثر دوزهای متفاوت تابشی بر استحکام چسبندگی تک لبه چسب‌های پایه اپوکسی پرداخته است [۲۱].

هدف از این بررسی ایجاد یک مدل تخریب اتصالات چسب اپوکسی تحت تابش محیط فضا بود. برای این کار ابتدا دوز تابش یک مدار مشخص برای ۲۰ سال تعیین می شود و نمونه چسب در معرض منبع ^{60}Co قرار می‌گیرد. یک قانون تخریب خطی برای مدول الاستیک و با استفاده از نسبت پواسون و همچنین برای مدول برشی برازش شده و سپس یک طرح محاسباتی نیز برای توزیع تنش استحکام اتصال تک لبه (SLS)، ارائه می‌شود. با ترکیب این طرح محاسباتی و مدل تخریب، استحکام کاهش یافته برای ضخامت‌های چسب تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کاهش استحکام چسبندگی با ضخامت چسب افزایش می‌یابد و ضخامت خط اتصال چسب تأثیر زیادی بر رفتار مکانیکی اتصال دارد. در شکل **۹** سفتی اتصال متاثر از دوز تابش تا ۱۰ MGy برای ضخامت پیوند از حدود ۰/۱ تا ۱ میلی متر نشان داده شده است. قابل ذکر است کاهش سفتی با افزایش ضخامت پیوند به دلیل رفتار غیرخطی افزایش می‌یابد گرچه گاهی رفتار مواد الاستیک خطی فرض می‌شود. میزان کاهش سفتی برای دوز تابشی 10 MGy و ضخامت چسب ۰/۲ میلی متر، حدود ۳/۲ درصد بوده و برای همان دوز تابشی ولی ضخامت پیوند ۱ میلی متر، سفتی حدود ۱۳/۸ درصد کاهش یافته است. در همه نمونه‌ها نسبت سفتی چسب به نسبت سفتی اولیه بدون تابش مقایسه می‌شود.



شکل (۹): تغییرات استحکام چسب اپوکسی تحت محدوده دوزهای تابشی و بر حسب ضخامت‌های مختلف [۲۱].

تغییرات خواص مکانیکی: با توجه به اهمیت خواص مکانیکی چسب‌های فضایی، مدول یانگ E، مقاومت تسلیم σy، مقاومت کرنش شکست کششی σr، استحکام تسلیم er از برخی از چسب ها در جدول **۱** نشان داده شده است. همان‌طورکه در جدول قابل مشاهده است مدول چسب ها از محدوده ۴ تا ۵ گیگا پاسکال برای چسب های استحکام بالا چون چسب بر پایه اپوکسی و پلی آروماتیک تا محدوده ۰/۲ گیگا پاسکال برای چسب های انعطاف پذیر با قابلیت کاربرد در ساختارهای منعطف

۱. Single Lap Shear (SLS)

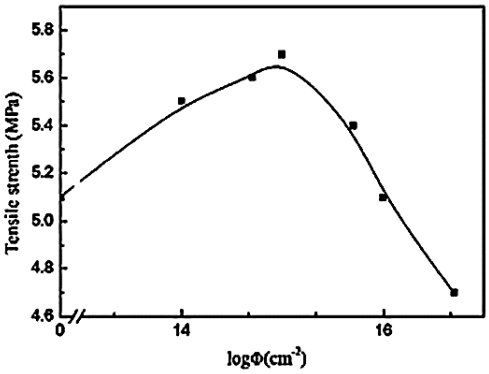
از جنس پلی یورتان ها می تواند باشد. استحکام شکست برای چسب های قوی تر تا حد ۶۰ مگاپاسکال هم دیده شده است. کرنش شکست به شدت به وجود عیوب مانند حفره ها و ریز ترک ها بستگی دارد. در کشش، هنگامی که یک ترک در کنار یک فضای خالی ایجاد می شود، نمونه اغلب در آنجا به دلیل تمرکز تنش بالا سریع دچار شکست می شود. بنابراین، باید در هنگام تهیه چسب بسیار کنترل شده باشد. همچنین، در مورد مقادیر کرنش شکست در کشش و برش برای چسب های قوی عموماً دارای محدودی در حدود ۱ یا ۲ درصد کشش هستند اما برای چسب های منعطف کرنش های شکست تا ۳۰۰٪ را می‌توان به دست آورد [۲۲].

جدول (۱): خلاصه تحقیقات بررسی شده در این پژوهش.

Adhesive	Manufacturer	Tension			
		E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_r (MPa)	ε_r (%)
Epoxies					
Araldite AV138	Huntsman	4,590	41.0	41.0	1.30
Hysol EA 9394	Loctite	4,420	31.0	59.8	4.64
Araldite 2015	Huntsman	1,850		22.5	4.40
Redux 810	Hexcel comp.	1,730		40.0	5.53
02 Rapid	Delo	1,000		24.0	20.0
Hysol EA 9361	Loctite	670		7.99	44.0
Polyurethanes					
Araldite 2026	Huntsman	200		18.0	50.00
Sikaflex 256	Sika				
Modified acrylics					
DP-8005	3M	590		13.0	5.30
Araldite 2024	Huntsman	760		20.0	42.5

با توجه به اهمیت خواص مکانیکی، تغییر در خصوصیات مکانیکی چسب‌های پلیمری نیز بسیار پر اهمیت می‌باشد. پرتو فرابنفش و ذرات پر انرژی هردو می‌توانند موجب تخریب پلیمرها شوند. در اصل اثرات اولیه تخریب به صورت، تغییر شکل، شکنندگی و تغییر رنگ مشاهده می‌شود که بر یکپارچگی مکانیکی و تعادل گرمایی مواد تأثیر می‌گذارد. این اثرات با اندازه‌گیری تغییرات استحکام برشی، استحکام کششی و آزمون پیل و خستگی تعیین می‌شوند. اصلاح خصوصیات مکانیکی نتیجه رقابت بین جدایش و ایجاد اتصالات عرضی در زنجیره‌های ماکرومولکول‌هاست. گسستگی و نرم‌شدگی زنجیره‌های پلیمری، منجر به کاهش الاستیک و استحکام و افزایش طول آن ها می‌شود. از جهت دیگر، تشکیل اتصالات عرضی جدید در زنجیره ماکرومولکولی منجر به ایجاد پلیمر دو یا سه بعدی می‌شود که این امر افزایش استحکام را در پی دارد اما از میزان انعطاف‌پذیری نمونه‌ها کاسته می‌شود در نتیجه پلیمر شکننده‌تر می‌شود [۲۴-۲۳].

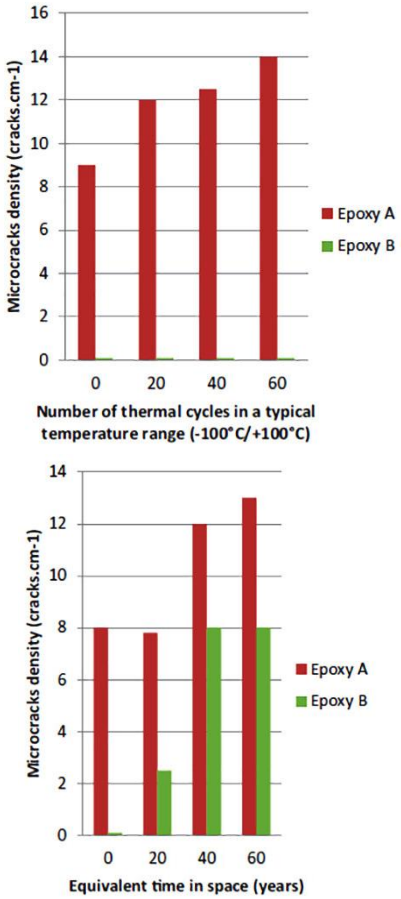
مطالعه نشان داده است که تابش ذرات پروتون با انرژی ۲۰۰keV با دبی 10^{15} p^+/cm^2 و تابش ذرات الکترونی با انرژی ۴۰۰ کیلوولت با دبی 10^{15} e/cm^2 سبب متراکم شدن شبکه (افزایش اتصالات شبکه‌ای کننده) می‌شود که همین امر منجر به افزایش دمای انتقال شیشه‌ای، افزایش استحکام کششی و افزایش مدول می‌شود. نکته قابل توجه این است که با وجودی که پروتون‌ها کمتر از الکترون‌ها نفوذ می‌کنند، اثرات تابش مشابه روی خصوصیات بالک مواد قابل تشخیص است و گاهی این تغییرات (شکنندگی زنجیره ها به علت تابش) به صورت ماکرومولکولی (ترک) قابل مشاهده است. در دوزهای بالاتر تابش، رقابت بین ایجاد اتصالات عرضی و شکاف زنجیره‌ها به سود مورد دوم بوده، در نتیجه تخریب پلیمر بیشتر اتفاق می‌افتد (شکل **۱۰**). در نتیجه کاهش دانسیته اتصالات عرضی و استحکام کششی از یک طرف و ایجاد ترک‌های سطحی در نتیجه کاهش طول زنجیره‌های اصلی از طرف دیگر پدیدار می‌شود [۲۴-۲۳].



شکل (۱۰): میزان تغییرات استحکام کششی متیل سلیکون بر حسب میزان تابش [۲۳].

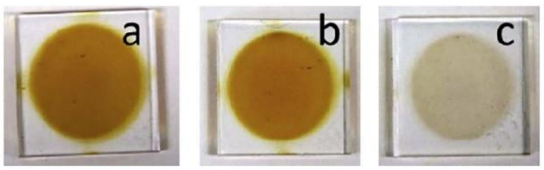
با وجودی که چسب‌ها در اصل در اجزای داخلی سازه‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و کمتر در معرض مستقیم با محیط فضایی هستند. با این حال مبنای انتخاب فرمولاسیون‌های آن‌ها، پایداری خواص مکانیکی در برابر اشعه های تابشی است. با همه تلاش‌هایی که در این راستا انجام می شود، میکرو ترک‌های ایجاد شده ناشی از تخریب تشعشعی نسبت به تخریب چرخه حرارتی که فضاپیماها در آن قرار دارند بیشتر است. مطالعات نشان داده است که سینتیک تخریب تشعشعات از نوع درجه دوم می‌باشد. در شکل **۱۱** تأثیر چرخه حرارتی و شبیه‌سازی لایه ژئو روی دو نوع چسب بر پایه اپوکسی نمایش داده شده است. نرم‌شدگی چسب‌ها در دمای بالا که منجر به تغییر شکل در ساختار مواد می‌شود و ایجاد میکرو ترک‌ها وابسته به ضریب انبساط حرارتی بین ماتریس و

الیاف، ناشی از قرار گرفتن در دماهای پایین قابل پیش بینی است که همزمان به دلیل تخریب تشعشعی افزایش می‌یابند. قابل بیان است بسته به نوع و خواص چسب میزان تغییرات متفاوت خواهد بود [۲۵].

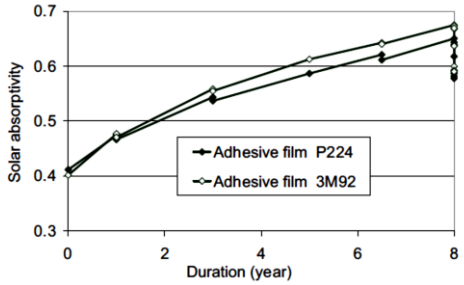


شکل (۱۱): اثری از چرخه حرارتی (بالا) و چرخه حرارتی همراه با شبیه سازی لایه ژئو (پایین) روی دو چسب بر پایه اپوکسی [۲۵].

تغییرات خواص نوری: اثر ماکروسکوپی تخریب پلیمرها، تغییر رنگ ماده است که ناشی از واکنش‌های شیمیایی در مولکول‌های آلی (شکست پیوند یا اتصالات عرضی) می‌باشد. بطور مشخص تابش ماورا بنفش در تیرگی چسب‌ها و پوشش-های نوری تأثیرگذار است. فیشر [۲۶] در تحقیقات خود تأثیر تابش پرتو فرابنفش بر چندین نوع چسب سیلیکونی با کاربرد اتصال سلول‌های خورشیدی به پنل ها را نشان داده است که ناشی از اتصالات عرضی در ساختار چسب‌هاست (شکل **۱۲**). همچنین، ذرات باردار نیز بسته به انرژی ذرات، ممکن است منجر به تغییر رنگ چسب‌ها و ایجاد دیگر اثرات در بالک ماده شوند. قابل بیان است گاهی افزایش جذب تنها یک نوار خورشیدی توسط چسب‌های پلیمری تغییرات بسیاری را در خواص آن ها به همراه دارد که اگر چسب به منظور اهداف کنترل اپتیکالی ماهواره باشد این مسئله بسیار حساس و بحرانی خواهد بود. این تغییرات همواره سر منشاء در بالک پلیمرها دارد. شکل **۱۳**، مقایسه بین دو چسب فضایی با کد 3 M92 (بر پایه سیلیکون) و P224 (بر پایه آکریلیک) تحت تابش ترکیبی ذرات باردار و پرتو فرابنفش را نشان می‌دهد که تخریب بیشتری برای چسب‌های سیلیکونی به دلیل تفاوت در خواص جذبی امواج مشاهده می‌شود [۲۷].



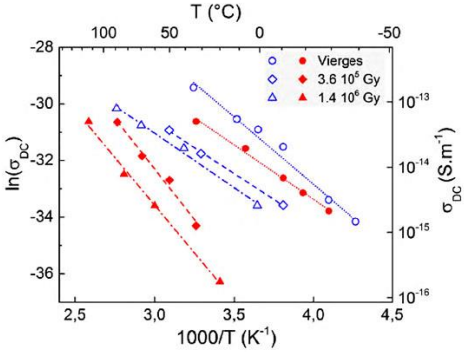
شکل (۱۲): تصویری از سه نوع چسب متفاوت بعد از قرار گیری در برابر تابش UV، **a**) الاستول ۶۹۰ **b**) الاستول ۶۹۵ و **c**) دو کرونینگ ۹۳-۵۰۰ [۲۶].



شکل (۱۳): بررسی میزان جذب امواج خورشیدی با شبیه سازی ۸ ساله محیط فضایی بر دونوع چسب سیلیکونی و آکریلاتی [۲۷].

تغییرات خواص الکتریکی: تغییرات هدایت الکتریکی ناشی از تابش و اثر متقابل ذرات باردار محیط فضایی با مواد بسیار پیچیده می‌باشد. تجمع بارها در سطح ماده ممکن است تخلیه الکتریکی و نشرهای الکترومغناطیسی را به همراه داشته باشد که موجب تغییر در خواص الکتریکی چسب‌ها شود و در نهایت بر عملکرد مطلوب تجهیزات الکترونیکی تأثیر گذارد. با وجودی که چسب‌های پایه اپوکسی به طور کلی تغییرات خاصی با توجه به محیط تابش ندارند اما مقادیر زیاد پرتوی تابش بر هدایت بالک اپوکسی‌ها نیز تأثیر خواهد گذاشت. مطالعات نشان داده است که در چسب‌های اسکاچ ولد DP490، پس از تابش الکترونی ۴۰۰ کیلوالکترون ولتی کاهش رسانایی بالک از 10^{-14} به 2×10^{-15} $(\Omega m)^{-1}$ می‌رسد. در حقیقت، چنین میزانی از دوز تابش انرژی، کهولت فیزیکی- شیمیایی را القا می‌کند که تمایل به برهمکنش یونی و در نتیجه تأثیرگذاری بر میزان هدایت الکتریکی را دارد. چسب‌های سیلیکونی نیز در شرایط مشابه تابشی (۴۰۰ کیلو الکترون ولت) کاهش هدایت الکتریکی را نشان می‌دهند [۲۸].

رفتار چسب‌ها بطور کلی علاوه بر بالک، تحت تأثیر وجود مواد پرکننده معدنی در فرمولاسیون نیز می‌باشد که حضور این سری از مواد، افزایش تخریب در شرایط جوی فضا را به همراه دارد (شکل **۱۴**). مکانیسم پیشنهادی تغییرات در ماتریس چسب سیلیکونی و در حدفاصل بین ماتریس و پرکننده‌ها از نوع مکانیسم شبکه‌ای شدن بیان شده است. افزایش تراکم پیوندهای SiO_3 بعد از تابش در شبکه پلیمری منجر به افزایش مقاومت الکتریکی چسب‌ها می‌شود. قابل بیان است، چسب‌های حاوی پرکننده‌های معدنی در اثر تابش دارای پیوندهای متقاطع SiO_4 در حدفاصل بین پرکننده – ماتریس می‌شوند که این پیوندها برای انتقال بار ممانعت بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند، بنابراین افزایش مقاومت الکتریکی به نسبت نمونه‌های پایه را به همراه دارند [۲۸].



شکل (۱۴): میزان تغییرات ناشی از تابش در گذر زمان با استفاده از منحنی آرنیوس (گراف‌ها با علامت‌های پر حاوی پرکننده معدنی می‌باشند) [۲۸].

تغییرات خروج اجزای فرار: اجزای فرار و گاهی اوقات اجزای کوچک مولکول با قابلیت تراکم‌پذیری در محیط فضایی (تحت خلا) ممکن است به آلودگی‌های سطوح ماهواره‌ها تبدیل شوند. تابش می‌تواند بر برون‌زدایی این دسته از مواد تأثیر بگذارد، زیرا که تخریب پلیمر ناشی از تابش منجر به تولید گاز می‌شود. بازده گاز خروجی، یکی از شاخص‌های مناسب برای مقاومت چسب در برابر تابش اشعه‌هاست که می‌تواند به تعیین مکانیسم تخریب کمک کند. تابش پرتوهای فرابنفش و پروتون‌ها ممکن است میزان خروج مواد چسبنده را افزایش دهند. همچنین، آزادسازی گونه‌های آلاینده در صورت گسستگی زنجیر مشکل دیگری است که این منابع آلوده‌کننده می‌توانند بر عملکرد فضاپیما تأثیر بگذارند و در مطالعات آلودگی مورد توجه قرار می‌گیرند. نکته مورد توجه دیگر این است که گاهی نرخ تولید بسیار بالا گونه‌های فرار ایجاد شده در طول تابش و عدم داشتن زمان کافی برای خروج از چسب دیده می‌شود که ممکن است منجر به مشاهده پدیده‌های غیرمنتظره ناشی از محدودیت‌های داخلی تولید شده توسط تجمع گاز شود. در شکل **۱۵**، نمونه‌ای از تخریب چسب آکریلیکی پس از قرار گرفتن در معرض تابش ذرات با شار زیاد نشان داده شده است. مشاهده حباب در زیر نوار، پدیده خروج گاز را اثبات می‌کند [۲۹].

شکل (۱۵): ایجاد حباب روی فیلم های اکریلیکی نماینده خروج حباب قبل از تابش (چپ تصویر) [۲۹].

۹- نتیجه‌گیری

از چسب‌ها به‌طور گسترده در صنعت هوافضا برای پیوند فلز به فلز، فلز به کامپوزیت و کامپوزیت به کامپوزیت استفاده می‌شود. در این راستا، خواص چسب‌ها اهمیت پیدا می‌کند به‌طوری‌که باید تحمل بار، تنش و لرزش‌های ناگهانی، همزمان با دارا بودن خواص الکتریکی و حرارتی به ویژه بسته به محل کاربری را داشته باشند. از دیگر مؤلفه‌های مهم پایداری چسب در شرایط جوی فضاست. در جو به دلیل حضور اکسیژن‌های اتمی پرانرژی، تشعشعات الکترومغناطیسی پراکنده شده از خورشید و ذرات پرانرژی الکترون و فوتون‌های انرژی، چسب‌ها همواره در معرض خطر تخریب می باشند. در این راستا، چندین خانواده شیمیایی چسب ازجمله اپوکسی، یورتان، سیلیکون و آکریلات در برنامه‌های فضایی مورد استفاده قرار می گیرند. بیشترین استفاده از اپوکسی‌ها برای خواص مکانیکی آن‌ها، سیلیکون‌ها برای پایداری بالا در محیط حرارتی، آکریلیک‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری و پلی یورتان‌ها به‌عنوان عایق می باشد. در صنعت هوا فضا خصوصیات مختلفی نظیر خواص نوری، حرارتی و الکتریکی در کنار استحکام بالا و حداقل جرم چسب‌ها بسیار اهمیت دارد. برای دستیابی به بهترین عملکرد، انواع حالت‌های چسب‌های سازه‌های فضایی و روش‌های تولید و اعمال آن ها مورد توجه است. قابل بیان است با توجه به موقعیت مکانی اتصالات در سازه‌های فضایی و بسته به ماموریت فضاپیما چسب‌ها در مواجه با محیط های فضایی مختلف (دارای ذرات باردار، UV یا اکسیژن اتمی) قرار می‌گیرند که به منظور ارزیابی خواص چسب و طراحی صحیح قطعات ماهواره توجه به همه این نکات مهم می‌باشد. در این راستا، شناخت و درک رفتار چسب‌ها در محیط فضایی و مطالعه پدیده‌های فیزیکوشیمیایی موثر بر آنها ضروری است.

۱۰- مراجع

[1] M. M. Finckenor, "Materials for spacecraft," American Institute of Aeronautics and Astronautics2018.

[2] U. Khashaba, R. Othman, and I. M. Najjar, "Development and characterization of structural adhesives for aerospace industry with alumina nanoparticles under shear and thermo-mechanical impact loads," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 234, pp. 490-507, 2020.

[3] S. Dagras, J. Eck, C. Tonon, and D. Lavielle, "Adhesives in space environment," *Handbook of adhesion technology. Cham: Springer*, 2018.

[4] S. Budhe, M. Banea, and S. De Barros, "Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues," *Applied Adhesion Science*, vol. 6, pp. 1-27, 2018.

[5] L.-H. Lee, "Adhesives, Sealants, and Coatings for Space and Harsh Environments," *Adhesives, Sealants, and Coatings for Space and Harsh Environments*, pp. 5-29, 1988.

[6] H.-r. Qi, D.-x. Shen, Y.-j. Jia, Y.-c. An, H. Wu, X.-y. Wei, *et al.*, "Preparation and Properties of Electrospun Phenylethynyl—Terminated Polyimide Nano-Fibrous Membranes with Potential Applications as Solvent-Free and High-Temperature Resistant Adhesives for Harsh Environments," *Nanomaterials*, vol. 11, p. 1525, 2021.

[7] D. J. Dunn, *Adhesives and sealants: technology, applications and markets*: iSmithers Rapra Publishing, 2003.

[8] S. Zhang and D. Zhao, *Aerospace materials handbook*: CrC Press, 2016.

[9] L. F. da Silva, "Technology of mixed adhesive joints," in *Hybrid adhesive joints*, ed: Springer, 2010, pp. 283-309.

[10] C. Bhuvaneswari, S. S. Kale, G. Gouda, P. Jayapal, and K. Tamilmani, "Elastomers and adhesives for aerospace applications," in *Aerospace Materials and Material Technologies*, ed: Springer, 2017, pp. 563-586.

[11] Z. Ahmadi, "Nanostructured epoxy adhesives: A review," *Progress in Organic Coatings*, vol. 135, pp. 449-453, 2019.

[12] S. Y. Park, W. J. Choi, C. H. Choi, and H. S. Choi, "The effect of curing temperature on thermal, physical and mechanical characteristics of two types of adhesives for aerospace structures," *Journal of adhesion science and Technology*, vol. 32, pp. 1200-1223, 2018.

[13] D. A. Dillard, *Advances in structural adhesive bonding*: Elsevier, 2010.

[14] G. Blugan, G. Mata-Osoro, S. Fecht, J. Janczak-Rusch, and J. Kuebler, "Torsional shear strength of steel joined with high performance aerospace adhesives at cryogenic and elevated temperatures," *Plos one*, vol. 13, p. e0206981, 2018.

[15] S. Ebnesajjad, *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*: William Andrew, 2010.

[16] F. C. Campbell Jr, *Manufacturing technology for aerospace structural materials*: Elsevier, 2011.

[17] H. Morawetz, "Radiation physics and chemistry of polymers, FA Makhlis, Halsted Press, New York, 1975, 287 pp. $32.50," *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition*, vol. 13, pp. 635-636, 1975.

[18] A. Paillous, "Radiation damage to surface and structure materials," in *The Behavior of Systems in the Space Environment*, ed: Springer, 1993, pp. 383-405.

[19] D. Clegg and A. A. Collyer, "Irradiation effects on polymers," 1991.

[20] K. Monib, "The Use of Silicone Adhesives in Space Applications‖," *Adhesives Magazine*, vol. 28, 2003.

[21] J. Zimmermann, J. Weiland, M. Z. Sadeghi, A. Schiebahn, U. Reisgen, and K.-U. Schröder, "Simplified stiffness analysis for degraded single lap joints in the space sector–Comparative analytical and finite element analysis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 234, pp. 1956-1966, 2020.

[22] L. F. M. da Silva, A. Öchsner, and R. D. Adams, *Handbook of adhesion technology* vol. 1: Springer, 2011.

[23] L. Zhang, Z. Xu, Q. Wei, and S. He, "Effect of 200 keV proton irradiation on the properties of methyl silicone rubber," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 75, pp. 350-355, 2006.

[24] H. Jochem, V. Rejsek-Riba, E. Maerten, S. Remaury, S. Solé, G. Sierra, *et al.*, "Effects of 400 keV electrons flux on two space grade silicone rubbers," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 141, pp. 189-194, 2013.

[25] A. Paillous and C. Pailler, "Degradation of multiply polymer-matrix composites induced by space environment," *Composites*, vol. 25, pp. 287-295, 1994.

[26] H. R. Fischer, C. Semprimoschnig, C. Mooney, T. Rohr, E. R. van Eck, and M. H. Verkuijlen, "Degradation mechanism of silicone glues under UV irradiation and options for designing materials with increased

stability," *Polymer degradation and stability*, vol. 98, pp. 720-726, 2013.

[27] J. Marco, S. Remaury, and C. Tonon, "Eight years GEO ground testing of thermal control coatings," *EADS Astriu*, 2009.

[28] S. Siegel and T. Stewart, "Vacuum-ultraviolet photolysis of polydimethylsiloxane. Gas yields and energy transfer," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 73, pp. 823-828, 1969.

[29] A. Roggero, "Analyse du vieillissement d'un adhésif silicone en environnement spatial: influence sur le comportement électrique," Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2015.