



نشریه علوم و فنون هوافضا

بررسی عوامل مؤثر در استحکام اتصالات سازه‌های کامپوزیتی هوایی

حمیدرضا تقوایی

کارشناسی ارشد سازه‌های هوایی

چکیده

کامپوزیت یا مواد مرکب رده‌ای از مواد پیشرفته هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به‌منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. ساختار سازه‌های کامپوزیتی معمولاً از به هم پیوستن اعضا جهت انتقال و تحمل نیروهای وارده حاصل می‌شود. استفاده از مواد مرکب نیازمند درک صحیحی از این مواد می‌باشد. در این میان محدودیتی برای طراحی و استفاده از این ماده در ساخت قطعات وجود دارد. اتصالات به علت حساسیت زیاد در برابر انتقال بار، تمرکز تنش و ناهمگونی طرفین اتصال، یکی از مهم‌ترین اجزا در سازه‌های کامپوزیتی هستند. اتصالات انواع متفاوتی دارند که هر کدام از این اتصالات دارای نقاط قوت و ضعف می‌باشند که با توجه به آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله به بررسی اتصالات کامپوزیتی و عوامل مؤثر در استحکام آن‌ها پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: سازه‌های کامپوزیتی هوایی، اتصالات مکانیکی، اتصالات چسبی، استحکام، عوامل مؤثر.

۱- مقدمه

مواد مرکب قرن‌ها است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی مواد مرکب یا کامپوزیت به موادی گفته می‌شود که از مخلوط چند ماده (حداقل دو ماده) با خواص متفاوت تشکیل شده و محصول ماده‌ای با خاصیت جدید و خواص مناسب‌تر می‌باشد. امروزه مواد مرکب در انواع سازه‌های مهندسی شامل فضاپیماها، هواپیماها، خودروها، مهندسی دریا و کشتی‌سازی به کار می‌رود. وجود ویژگی‌هایی چون استحکام مخصوص بالا، سختی مخصوص بالا، عمر خستگی زیاد، وزن کم، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت در برابر خوردگی و خواص گرمایی کامپوزیت‌ها، علل کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف می‌باشد. کامپوزیت‌ها از دو قسمت اصلی ماتریس^۲ و الیاف^۳ تشکیل شده است. اولین تلاش‌های تئوری برای طراحی اتصالات توسط ولکرسون در سال ۱۹۳۸ صورت گرفت؛ که در آن درک اولیه از تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در اتصال دهنده و قطعات اتصالی تک لبه و دو لبه پرداخته شد. آن‌ها اتصال چسبی یک لبه لایه چسب را به صورت فنرها پیوسته برشی مدل سازی نمودند. در این مدل از اثر گشتاور خمشی ایجاد شده به علت غیر هم مرکز بودن مسیر بار صرف نظر شده است، این اثر برای چسبنده‌های کامپوزیتی با استحکام و مدول برشی و عرضی کم بسیار مهم هستند [۱] کلیک به مطالعه و بررسی خواص مکانیکی بر اثر افزودن ذرات فلزی آلومینیوم و مس در محل اتصال دو کامپوزیت پرداخت. او گزارش داد که با افزودن ذرات فلزی، استحکام کششی اتصال کاهش یافته ولی استحکام برشی تا میزان ۰٫۸۴ در صد حجمی افزودن المان تقویتی به طور چشم‌گیر افزایش داشته و با افزایش میزان حجمی المان‌های تقویتی استحکام برشی کاهش یافته است. [۱]

مین یو^۷ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ به استفاده از فلز به عنوان المان تقویتی در قسمت فیلت اتصال تک لبه تحت تنش کششی پرداختند. آن‌ها از سیم فلزی با ضخامت ۰٫۸ میلی‌متری و ۱٫۲ میلی‌متری و میله فلزی با سطح مقطع مثلثی و دایره‌ای در قسمت فیلت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سیم جایگذاری شده با ضخامت ۱٫۲ در فیلت استحکام برشی را تا ۴۵٪ افزایش داده و سبب تغییر مود شکست می‌شود. [۲] هلیچ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به تحلیل رفتار شکست کامپوزیت تک لبه تقویت شده با المان تقویتی سیم (لبه‌های کامپوزیت دوخته شده) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شکست در حالت استاتیکی و خستگی در کامپوزیت‌های متصله و ناشی از جدایش لایه‌ها خواهد بود. رشد ترک در حالت خستگی پایدار و در حالت استاتیکی ناپایدار است. همچنین بخیه زنی سبب بهبود ۴۰٪ استحکام کششی نهایی شده و در جلوگیری از سرعت رشد ترک

Composite

^۲Matrix^۳Fibers^۴Volkersen^۵Adherents^۶Kilik^۷Min You^۸Aymerich^۹Delamination

تحت بارگذاری خستگی بسیار مؤثر است. [۱] جو کیم و هی کیم بررسی اتصالات مکانیکی چند پین صفحات کامپوزیتی را انجام دادند. آن‌ها مسئله را به صورت دوبعدی در نظر گرفتند، حول سوراخ قید جابجایی را صفر قرار دادند و در انتها صفحه بار یکنواخت اعمال کردند. [۲] و [۳] کوانگ سو و همکارانش به مطالعه رفتار خستگی و رشد ترک و کسری از زمان خستگی که ترک ایجاد و منجر به شکست می‌شود، پرداختند. آن‌ها دریافتند که کسری از عمر خستگی که می‌گذرد تا ترک ایجاد شود در محدوده‌ی ۲۰٪ و حداکثر تا ۷۰٪ عمر قطعه هست که به طول اتصال قطعات و میزان تنش‌ها بستگی دارد. [۴]

کیون و ژانگ در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش تجربی باری که باعث گسیختگی اتصال مکانیکی-چسبی بین آلومینیم و کامپوزیت می‌شود را به دست آوردند. آن‌ها همچنین نوع گسیختگی را نیز تعیین کردند. [۵]

پارکر در سال ۲۰۱۴ از المان‌های تقویتی نفوذی پینی شکل در محل اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده نمود. او دریافت که وجود پین‌ها در محل اتصال سبب تأخیر در رشد ترک و کند کردن رشد ترک‌ها می‌شود. همچنین این روش سبب بهبود استحکام نهایی به میزان ۶٫۵ برابر بیشتر نسبت به زمانی که پین موجود نباشد شده است و همچنین توانایی جذب انرژی ۸۰ برابر بیشتر شده است. [۶]

۲- تعریف مسئله

سازه‌ها از چندین عضو تشکیل شده‌اند که به وسیله اتصالات به یکدیگر متصل می‌شوند. انتقال بار در سازه‌ها معمولاً توسط این اتصالات صورت می‌گیرد، لذا یکی از نقاط بحرانی سازه‌ها به شمار می‌روند. به همین دلیل طراحان توجه خاصی به طراحی اتصالات دارند تا هم‌وزن و هزینه را کنترل نمایند و هم مقاومت و عمر قطعات را بالا ببرند. به دلیل طبیعت نرم اکثر فلزات معمولاً تحلیل تنش دقیق در اتصالات فلزی مورد نیاز نمی‌باشد و روند طراحی این اتصالات ساده می‌باشد، در حالی که برای طراحی و تحلیل تنش اتصالات مواد کامپوزیتی باید پارامترهای زیادی را در نظر گرفت. در اتصالات مواد مرکب به خاطر یکسان نبودن خواص مواد در تمام جهت‌ها (غیر ایزوتروپیک بودن) محدودیت‌هایی نسبت به اتصالات فلزات وجود دارد. از این رو برای تحلیل، لازم است عوامل مؤثر در مقاومت اتصال شناخته شود، تا با کمک آن بتوان به یک روند پیشرفت طراحی اتصال با افزایش مناسب کارایی رسید. تعیین رفتار اتصالات به صورت تجربی برای تکمیل کارهای تئوری مورد نیاز است؛ اما یکی از مشکلات اساسی کامپوزیت‌ها این است که با تغییر در درصد حجمی الیاف، نحوه‌ی لایه چینی، ترتیب لایه گذاری، ضخامت لایه و ... می‌توان مواد گوناگونی از لحاظ تفاوت در خواص مکانیکی تولید نمود. لذا با توجه به تنوع موجود در کامپوزیت‌ها برای جلوگیری از هزینه مورد نیاز برای تست کلیه‌ی حالت‌های ترکیبی، یک روش

^۱Kim, Jo
^۲Kim, Ho
^۳Kwang-Soo Kim
^۴Kweon
^۵Jung
^۶Parkes

پیش‌بینی عمومی مورد نیاز است. ارائه یک روش کاربردی کلی برای پیش‌بینی استحکام اتصال مشکل است، اگر چه برای بعضی از مودها استفاده از روش‌های دوبعدی نتایج خوبی را نشان می‌دهد. به دلیل استفاده روزافزون از مواد مرکب در صنایع پیشرفته به خصوص در سازه‌های مربوط به صنایع هوافضا، داشتن اطلاعات کافی و دقیق از نحوه‌ی اتصال و توزیع تنش در این سازه‌ها گریزناپذیر است؛ به خصوص این‌که اتصالات معمولاً یکی از نقاط بحرانی سازه‌ها می‌باشند. آمار نشان می‌دهد که تقریباً ۷۰ درصد از گسیختگی‌هایی که در سازه‌ها اتفاق می‌افتد از اتصالات شروع می‌شوند؛ بنابراین در این مقاله به صورت مختصر و کلی انواع اتصالات کامپوزیت‌ها و عوامل مؤثر بر استحکام آن‌ها را بررسی شده است.

۳- انواع اتصالات در کامپوزیت‌ها

اتصالات در مواد کامپوزیتی معمولاً به ۳ گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: اتصالات چسبی^۱ و اتصالات مکانیکی^۲ و اتصالات چسبی-مکانیکی. همان‌طور که از اسم اتصالات چسبی مکانیکی معلوم است این اتصالات توأم باهم می‌باشند.

عوامل مؤثر بر اتصالات چسبی شامل خواص چسب، شرایط محیطی، آماده سازی سطح اتصال و طراحی اتصال می‌باشد. [] خواص مکانیکی و شیمیایی چسب تعیین کننده میزان چسبندگی، استحکام، دوام و نوع شکست می‌باشند. شرایط محیطی نظیر دمای محیط، میزان رطوبت محیط و ... می‌باشند که بر عملکرد و دوام چسب تأثیر فراوانی دارند. در ادامه به شرح برخی از این خواص خواهیم پرداخت. تغییرات دما باعث ایجاد تغییراتی در مقاومت چسب‌ها، مدول یانگ، مقاومت در برابر خزش و ... می‌شود. در شکل ۱ تغییرات مقاومت در برابر برش و پوسته شدن بر اثر تغییرات دما در چسب‌ها نشان داده شده است.

Adhesive	Temperature °C								
	-253	-196	-73	-54	Room	82	149	216	260
Epoxy-nitrile modified	L/V	L/V	L/E	L/E	H/E	M/V	L/MO	...	...
Epoxy-nylon	L/E	L/E	L/E	L/E	H/V	L/G	L/MO	...	...
Epoxy-phenolic	...	...		L/V	L/V	L/V	L/G	G	G
Vinyl-phenolic	...	...		...	M/E	H/E	L/MO	...	...
Nitrile-phenolic	MO	E		E	H/V	M/G	L/MO	...	...
Bismaleimides	...	...		...	L/G	L/G	L/G	L/V	...
Polyimides	...	...		...	L/G	L/G	L/G	L/G	L/G
Polyurethanes	H/V	H/V		H/V	H/G	H/MO	H/P	...	...
Acrylics	...	...		...	H/E	M/G	L/P	...	...

شکل (۱) تغییرات مقاومت در برابر برش و پوسته شدن بر اثر تغییرات دما در چسب‌ها [۱۰]

^۱Adhesive joints

^۲Mechanical joints

ضریب انبساط حرارتی در چسب‌ها معمولاً به صورت قابل توجهی بیشتر از قطعات مورد اتصال می‌باشد که در شکل ۲ نمایش داده شده است، بنابراین در اتصالات چسبی تغییرات دما باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و پیچش در لایه چسب و قطعات مورد اتصال می‌شود. از طرف دیگر با توجه به اینکه ضریب انبساط حرارتی چسب‌ها در دماهای بالاتر از دمای عبور شیشه‌ای به طور قابل توجهی بیشتر از ضریب انبساط حرارتی در دماهای پایین‌تر از دمای عبور شیشه‌ای می‌باشد، برای کاهش تنش‌های حرارتی باید از چسب‌هایی استفاده نمود که دمای محیط پایین‌تر از دمای عبور شیشه‌ای برای آن چسب‌ها می‌باشد. خواص اکثر چسب‌ها به شدت تحت تأثیر آماده‌سازی سطوح مورد اتصال می‌باشد. سطح قبل از اتصال علاوه بر صاف بودن باید خشک باشد و همچنین باید از هر گونه آلودگی به روغن‌ها و گریس‌ها پاک شوند. وجود فضاهای خالی در سطوح مورد اتصال یکی از متداول‌ترین مشکلاتی است که در اکثر اتصالات چسبی رخ می‌دهد، که علت آن نفوذ هوا در داخل لایه چسب می‌باشد. ایجاد فضاهای خالی باعث افت شدید در خواص مکانیکی چسب می‌شود.

Material	$\alpha (\times 10^{-6} K^{-1})$	
Aluminum	29	
Aluminum alloy 4% copper	27	
Steel	11	
Titanium	9	
Sode- glass	8.5	
Wood (along grain)	3-5	
Wood (across grain)	35-60	
	Below T_g	Above T_g
Epoxide DGEBA/ diethylene tetramine	63	180
Epoxide DGEBA/ 1,3-diaminobenzene	57	210
PMMA	26	53

شکل (۲) ضریب انبساط حرارتی برای بعضی از مواد و چسب‌ها [۱۰]

معمولاً برای خروج هوای محبوس شده دو سطح مورد تماس را به طرف یکدیگر تحت فشار قرار می‌دهند تا هوای داخل لایه چسب خارج گردد. مهم‌ترین عامل برای کنترل و بهینه‌سازی در رفتار اتصال طراحی اتصال می‌باشد که در ادامه انواع اتصالات چسبی مرسوم و مشخصات و ویژگی‌های هر یک از آن‌ها توضیح داده خواهد شد. تخریب در اتصالات چسبی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

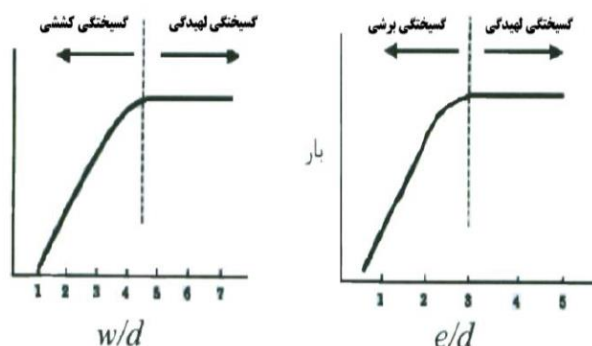
(۱) تخریب در لایه چسب

(۲) تخریب در قطعات مورد اتصال

در ادامه به بررسی روش‌های بهبود استحکام اتصالات مکانیکی می‌پردازیم. [۱۱] برای بررسی این موضوع، اتصالات مکانیکی را باید مربعی دانست که هر ضلع آن نقش خاصی را در استحکام دارد. اضلاع

این مربع شامل هندسه اتصال، نوع اتصال دهنده، شرایط ایجاد سوراخ اتصال و مشخصات چند لایه‌ی کامپوزیتی است.

حالات گسیختگی به نسبت ضریب مؤثر عرض به قطر $(\frac{w}{d})$ و نیز فاصله لبه به قطر $(\frac{e}{d})$ وابسته می‌باشد. تغییرات نیروی گسیختگی با نسبت‌های $(\frac{w}{d})$ و $(\frac{e}{d})$ برای یک صفحه ایزوتوپ در این شکل نشان داده شده است. برای مقادیر برای بالای $\frac{w}{d}$ و $\frac{e}{d}$ ، اتصال در حالت لهیدگی گسیخته می‌شود و نیروی گسیختگی به $\frac{w}{d}$ و $\frac{e}{d}$ بستگی ندارد. در مقادیر پایین $\frac{w}{d}$ ، گسیختگی کششی روی سطح مقطع خالص حاکم می‌باشد و وقتی $\frac{w}{d} = 1$ باشد، نیروی اتصال به صفر می‌رسد. همچنین اگر فاصله لبه کاهش یابد، گسیختگی برشی اتفاق افتاده و وقتی $\frac{e}{d} = 0.5$ باشد، مقاومت اتصال به صفر می‌رسد. شکل ۳ حالات مختلف گسیختگی اتصالات مکانیکی بر اساس شرایط هندسی را نشان می‌دهد



شکل (۳) حالات مختلف گسیختگی اتصالات مکانیکی بر اساس شرایط هندسی [۱۱]

اتصال دهنده‌های مورد استفاده جهت اتصال مواد مرکب، می‌توانند فلزی یا غیرفلزی باشند. اتصال دهنده‌ی فلزی به علت امکان خوردگی گالوانیک با مواد کربن-اپوکسی، عمدتاً تیتانیوم یا فولاد ضدزنگ ساخته می‌شوند. از آلیاژهای دیگر مانند آلومینیوم و یا فولاد، به شرطی می‌توان استفاده کرد که هیچ‌گونه تماسی با سطح ماده مرکب نداشته باشند. طبیعی است که اگر اتصال دهنده دچار آسیب خوردگی شود، دیگر آن استحکام اولیه را ندارد. با استفاده از اتصال دهنده‌های غیرفلزی که از رزین ترموست یا ترموپلاستیک تقویت شده به وجود می‌آیند مسائل خوردگی از بین می‌رود اما این اتصالات در حد اتصالات فولادی یا تیتانیومی نمی‌باشد. در سوراخ‌کاری مناسب است که صفحات با دقت گرفته شوند و بهتر است ابزارآلات خاص برای محکم بستن این صفحات ساخته شود. تمایل لایه‌لایه شدن لایه‌ها در هنگام سوراخ‌کاری را می‌توان با پوشش یک لایه رزین روی قسمت پشت کاهش داد. همچنین لایه‌لایه شدن را می‌توان با کنترل فشار پشت مته (فشار بسیار کم) کاهش داد.

چندین روش جهت تقویت کردن سوراخ‌های مواد مرکب برای افزایش مقاومت لهیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها شامل اضافه کردن چند لایه، چسباندن صفحات اضافه در اطراف سوراخ و یا چسباندن یک قسمت داخل سوراخ می‌باشند. اگرچه با استفاده از قابلیت بالای مواد مرکب،

می‌توان با طراحی بهینه و لایه چینی مناسب، اطراف حفره را تقویت نمود، ولی هزینه آن بسیار بالاست. با استفاده از الیاف مدول پایین شیشه در اطراف سوراخ اتصال، لایه‌لایه شدگی این ناحیه افزایش یافته و در نتیجه تمرکز به شدت کاهش می‌یابد.

عواملی مانند زوایای الیاف، نوع لایه چینی، جنس الیاف و رزین و همچنین درصد حجمی این مواد تأثیر مستقیمی روی استحکام و نوع شکست اتصالات دارند؛ اما یک عامل که از دیگر عوامل مهم‌تر می‌باشد اثر نوع لایه چینی است. به عنوان مثال اگر سه زاویه دلخواه مدنظر برای لایه چینی باشد طبقه رابطه جایگشت $n!$ تعداد $6! = 720$ حالت مختلف برای قرار گیری لایه‌ها خواهیم داشت. به همین ترتیب برای ۴ زاویه الیاف ۲۴ حالت و برای ۵ زاویه الیاف ۱۲۰ حالت وجود دارد. در یکی از تحقیقاتی که به‌صورت آزمایشگاهی برای ۴ زاویه الیاف ۲۴ حالت و ۵ زاویه الیاف ۱۲۰ حالت وجود دارد. در یکی از تحقیقاتی که به‌صورت آزمایشگاهی برای ۴ زاویه ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ الیاف صورت گرفته و چند لایه مورد نظر متقارن - یعنی ۸ لایه- بوده است. نتایج تغییر لایه چینی بسیار محسوس می‌باشد. به عنوان مثال: اگر نوع لایه چینی تغییر کند میزان ظرفیت بار قابل تحمل توسط اتصال تغییر خواهد کرد. تغییر لایه چینی منجر به تغییر شکل شکست اتصال شد. اگر الیاف با زاویه ۹۰ درجه هرچقدر به سمت سطح چند لایه نزدیک‌تر باشد نوع شکست اتصال به شکست لهیدگی نزدیک‌تر خواهد شد و این قضیه جلوی شکست‌های فاجعه‌بار دیگر را خواهد گرفت. [۱]

x

جدول (۱) مزایا و معایب اتصالات چسبی و مکانیکی [۱۱]

مزایا	معایب	مزایا	معایب
اتصالات چسبی		اتصالات مکانیکی	
تمرکز تنش کم در قطعات اتصال	محدودیت ضخامت	محدودیت ضخامت ندارد	تمرکز تنش قابل توجه دارد
عملکرد عالی در مقابل خستگی	بازرسی مشکل	اتصال به سادگی انجام	مقاومت کم در برابر خستگی
عدم نیاز به سوراخ کاری	مستعد کاهش خواص در مقابل عوامل محیطی	بازرسی امکان‌پذیر است	امکان ایجاد خرابی در مواد اطراف سوراخ
عایق در مقابل خوردگی	حساس در مقابل تنش‌های جدایی در طول	نسبت به عوامل محیطی حساس نمی‌باشد	مستعد سایش می‌باشد
-	ضخامت	تنش پسماند ایجاد نمی‌کند	مستعد خوردگی می‌باشد
صافی سطح تمام شده	نداشتن قابلیت باز شدن اتصالات	می‌توان آن را باز و بسته کرد	-
نسبتاً سبک	نیاز به کنترل کیفیت بالا	-	-

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، عوامل مؤثر بر انواع اتصالات چسبی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته شد. مواد کامپوزیتی به علت بروز ویژگی‌هایی چون نسبت قابل توجه سفتی و سطح تنش تسلیم به وزن و همچنین مقاومت بالا در برابر خوردگی، امروزه کاربردهای فراوانی را در صنایع پهلپادی دارند، همچنین در ترمیم و تقویت سازه‌ها بسیار کاربرد دارند؛ اما در این میان محدودیتی برای طراحی و استفاده از این ماده در ساخت قطعات وجود دارد. یکی از ضعیف‌ترین و بحرانی‌ترین قسمت‌ها، اتصالات کامپوزیتی به شمار می‌رود. با توجه به افزایش روزافزون استفاده از مواد کامپوزیتی، نیاز به مطالعه و درک صحیح از این مواد احساس می‌شود. با توجه به مزایا و معایب هر کدام از انواع اتصالات می‌توان هزینه و وزن سازه را به طور چشمگیری کاهش داد.

در اینجا روش‌های اتصال در مواد مرکب بیان و شرح داده شده و نتایج زیر در ابتدا جهت افزایش ظرفیت تحمل بار و در آخر تغییر نوع شکست اتصال آورده می‌شود:

به طور کلی اتصالات مکانیکی در مواد مرکب به چهار عامل اصلی وابسته است که عوامل عبارت‌اند از: هندسه اتصال، نوع اتصال دهنده، شرایط ایجاد سوراخ اتصال، مشخصات چند لایه‌ی کامپوزیتی.

افزایش عرض چند لایه از شکست کششی و افزایش فاصله سوراخ اتصال تا لبه از شکست برشی و رعایت هم‌زمان عرض و فاصله از انتها از شکست کنندگی، از عوامل تأثیر هندسه بر اتصال این گونه مواد هستند. با انتخاب جنس مناسبی برای اتصال دهنده از شکست آن جلوگیری کرده و برای ایجاد سوراخ در چند لایه‌های مرکب برای جلوگیری از آسیب شان باید استانداردهایی از جمله نوع مته، نیروی پشت مته، ابزار نگهداری چند لایه و غیره را رعایت نمود.

آزمایشات صورت گرفته حاکی از آن است که اگر لایه با الیاف ۹۰ درجه به سمت سطح چند لایه آورده شود ظرفیت تحمل بار افزایش و نوع شکست، لهیدگی خواهد شد که این نوع از گسیختگی بدون علامت و آنی نبوده و آسیب کمتری به سازه کامپوزیتی خواهد زد.

اتصالات چسبی مناسب‌ترین روش برای متصل کردن کامپوزیت‌های پلیمری هستند. همانند سایر روش‌ها این فناوری نیز دارای محدودیت‌هایی است. بر این اساس، به منظور دستیابی به خواص مناسب و کاهش مشکلات مرتبط با اتصالات چسبی، کلیه مراحل آن باید به‌طور دقیق اجرا شود. فعالیت‌های پژوهشی گسترده‌ای در حال انجام است. از زمینه‌های نوظهور، پژوهش در جهت دستیابی به چسب‌های چندمنظوره و هوشمند است. در این راستا توسعه چسب‌های ساختاری خودترمیم شونده، از ضرورت‌های لازم است. با توجه به نوع سازه و شرایط کاربرد، استفاده از اتصالات ترکیبی از قبیل چسب و اتصال مکانیکی قابل بررسی است.

۱۴- منابع

-
-
- [1] Volkersen, Olaf. "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten." *Luftfahrtforschung* 15 (1938)
 - [2] D. R. Kilik F., Use Al and Cu as reinforcement particle in composite lap jointe, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1989
 - [3] You, Min, et al. "Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints." *International journal of adhesion and adhesives* 23.5 (2003).
 - [4] Aymerich, Francesco, R. Onnis, and Pierluigi Priolo. "Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint." *Composites Part A: applied science and manufacturing* 36.5 (2005)
 - [5] Kim, Seung Jo, and Jin Hee Kim. "Finite element analysis of laminated composite plates with multi-pin joints considering friction." *Computers & structures* 55.3 (1995).
 - [6] Kim, Seung Jo, and Jin Hee Kim. "Effects of geometries, clearances, and friction on the composite multipin joints." *AIAA journal* 34.4 (1996)
 - [7] Kim, Kwang-Soo, et al. "Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods." *Composite structures* 72.4 (2006)
 - [8] Kweon, Jin-Hwe, et al. "Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding." *Composite structures* 75.1-4 (2006)
 - [9] Parkes, P. N., et al. "Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement." *Composite Structures* 118 (2014).
- [۱۰] علی‌ها دیون زاده/ دکتر محمد رحیم نامی، مدل‌سازی و تحلیل اتصالات چسبی بین قطعات کامپوزیتی و فلزی و بررسی تأثیر پارامترهای مربوطه بر رفتار مکانیکی اتصال در راستای بهبود راندمان آن، کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸
- [۱۱] محسنی شکیب، محسن، مکانیک سازه‌های مرکب، انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)، ۱۳۸۵، سری مکانیک ۱۳۸۸
- [12] Graham, D. P., et al. "The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 64 (2014)