



مروری بر جذب انرژی در ساختارهای کامپوزیتی مورد استفاده در

شناورهای تندرو

ایرج کیوان فر^۱، محمدرضا خدمتی^۲

تهران - دانشگاه صنعتی امیر کبیر - دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی

khedmati@cic.aut.ac.ir

چکیده

ماده کامپوزیتی از دو یا چند قسمت مجزای فیزیکی ساخته شده است که هر قسمت اکثر ساختار اصلی و هویت خود را حفظ کرده است. واضح است که این مقوله محدوده وسیعی از مواد را شامل می شود، از جمله مواد طبیعی (چوب، استخوان و دندان) و مواد ساخته دست بشر (کاغذ، بتن مسلح، فایبر گلاس). در این بررسی فقط بر روی دو گروه از مواد کامپوزیت تمرکز می شود: الیاف تقویت شده پلاستیک و ساختارهای ساندویچی. این نوع الیاف در سازه شناورهای تندرو کاربرد وسیعی دارند.

در این بررسی، علاوه بر بدست آوردن اطلاعاتی از حوزه وسیع منابع موجود، یافته های مربوط به مطالعات تحقیقی در مورد خواص جذب انرژی توسط این مواد با هم مقایسه می شوند. این بررسی به این معنا نیست که تمام قسمتها را در بر گیرد، بلکه موضوعات بهم پیوسته اصلی و چگونگی این مبحث گسترده را برجسته می کند و وسعت دانسته های موجود را تأیید می نماید.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی کشتی سازی و مهندسی دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

^۲ - استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و مهندسی دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)



کلمات کلیدی : ماده کامپوزیتی - جذب انرژی - ساختارهای ساندویچی

خواص جذب انرژی در الیاف تقویت شده پلاستیک (اف آر پی)

تاریخچه الیاف تقویت شده پلاستیک مدرن از دوران جنگ جهانی دوم می باشد. این مواد ابتدا به خاطر خاصیت انتقال الکترومغناطیس در برجهای رادار مورد استفاده قرار گرفتند. بهرحال، مهندسان خیلی سریع متوجه فواید گسترده و فرصتهایی که این مواد ارائه کرده بودند شدند. مقاومت ویژه و سفتی بالای این مواد به همراه مناسب بودن برای ساخت هندسه های پیچیده، امکان ورود تدریجی آنها را در کاربردهای سازه ای فراهم کرد.

اولین قایق فایبرگلاس در سال ۱۹۴۲ ساخته شد و اولین هواپیما با بدنه فایبرگلاس نیز در سال ۱۹۴۴ پرواز کرد. همچنین اولین پوسته فایبرگلاس بر روی بدنه اتومبیل در سال ۱۹۵۳ معرفی شد. امروزه استفاده از اف آر پی ها معمول شده و عمدتاً در محدوده وسیع تولیدات هر بخش صنعتی یافت می شوند.

با توجه به کاربرد آنها، امروزه دانسته های ما در مورد خواص مکانیکی اف آر پی ها پیشرفت قابل توجهی داشته است. ماتئوس و راولینس (Matthews & Rawlins) و همینطور سلین و هال (Hull & Clyne)، مقدمه مناسبی را در این زمینه تهیه کرده اند. بهرحال، تنها از زمان دهه ۱۹۷۰ به بعد است که محققان توجه خود را به خواص جذب انرژی توسط این مواد معطوف داشته اند. معمولاً، طبیعت و نیز خاصیت ایزوتروپ اف آر پی ها به این معنی است که تعداد متغیرهای زیادی برای کنترل رفتار مکانیکی این مواد وجود دارد. در قابلیت جذب انرژی نیز استثناء وجود ندارد. این نکته در جدول ۱ نشان داده شده است که در آن میزان جذب انرژی ویژه برای لوله های اف آر پی تحت فشار محوری در هندسه ها و لایه گذاری های مختلف ثبت شده است.

مشاهده می شود که قابلیت جذب انرژی اف آر پی با تغییر در مواد و پارامترهای هندسی به میزان قابل توجهی دگرگون می شود. برای مقایسه، جدول ۱ شامل مقادیر برای استیل و آلومینیم نیز می باشد. واضح است که با انتخاب هندسه ولایه گذاری مناسب، می توان اف آر پی هایی با جذب انرژی ویژه بالاتر از فلزات نوعی مورد استفاده در ساختار سازه های



مختلف تولید کرد. همچنین لین و میس (Lin & Mase) ثابت کرده اند که اف آر پی ها جذب انرژی بالاتری نسبت به فلزات در واحد طول دارند.

جدول ۱. جذب انرژی ویژه برای لوله های اف آر پی و نیز لوله های فلزی تحت فشار محوری

Fibre - Matrix	Lay-up [†]	Thickness to Outside Diameter Ratio	Specific Energy Absorption (kJ/kg)	Reference
Carbon - Epoxy	[0/±15] ₃	0.033	99	Farley ⁸
Carbon - Epoxy	[±45] ₃	0.021	50	Farley ⁹
Aramid - Epoxy	[±45] ₈	0.066	60	Thornton ¹⁰
Aramid - Epoxy	[0/±15] ₂	0.020	9	Farley ⁹
Glass - Epoxy	[0/±75] ₂	0.069	53	Farley ⁸
Glass - Epoxy	[0/±15] ₂	0.060	30	Farley ⁸
1015 Steel	-	0.060	42	Thornton & Magee ¹¹
6061 Aluminium	-	0.060	44	Thornton & Magee ¹¹

اغلب کارهای موجود در ارتباط با قابلیت جذب انرژی اف آر پی ها بر روی رفتار نمونه های لوله ای شکل متمرکز شده است و این مقاطع در کانون اصلی این بررسی ها قرار دارند. معمولاً رفتار لوله های اف آر پی را تحت فشار محوری مورد آزمایش قرار می دهند و مفاهیم مورد نیاز در رابطه با جذب انرژی را توسط نتایج مکانیزم شکست تشخیص می دهند. بعلاوه، ماده اصلی، هندسه و فاکتورهای تجربی که در ارتباط با اثرات جذب انرژی بدست آمده بود، در راستای انتخاب روشهای مناسب برای تشخیص قابلیت جذب انرژی اف آر پی ها خلاصه سازی می شوند.

مکانیزم شکست برای لوله های اف آر پی تحت فشار

معمولاً اف آر پی هایی موسوم به پلیمرهای ترموست مکانیزم شکستی مانند مکانیزم شکست نرم برای فلزات ارائه نمی کند. در عوض، طبیعت ترد اکثر الیاف و ترموست ها به سمت ایجاد مود شکست ترد میل می کند. این اختلاف بنیادین است که باعث گسترش سریع خواص جذب انرژی اف آر پی ها می شود. طبق بیان هال (Hull) سه راه عمده برای شکست لوله های اف آر پی تحت نیروی فشار محوری وجود دارد که عبارتند از:



۱. کمانش اولر

۲. کمانش پوسته، در جهت ایجاد مفصل و تاشدگی

۳. شکست ترد

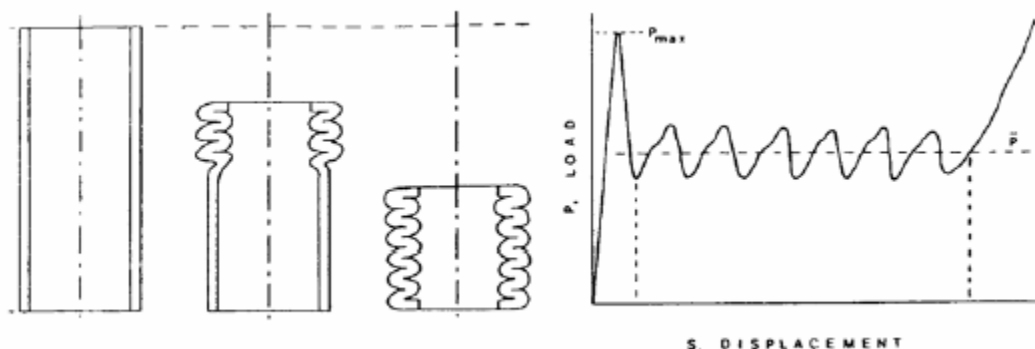
که هر کدام در ذیل توضیح داده می شود.

کمانش اولر:

لوله های نازک معمولاً در اثر کمانش اولر دچار شکست می شوند قبل از آنکه مکانیزم شکست دیگری شروع شود. کمانش اولر ترازهای خیلی پایین جذب انرژی را بدست می دهد، زیرا شکست به یک ناحیه خاص از لوله محدود شده است. این حالت با انتخاب طول و قطر و ضخامت مناسب برای لوله براحتی قابل اجتناب است.

تاشدگی:

تاشدگی شامل ایجاد تغییر شکلهای پی در پی و خمهای محلی می باشد، مانند اینکه لوله مطابق concertina تاخوردن باشد (شکل ۱). اگرچه این حالت، مود شکست مشخصه اغلب لوله های فلزی تحت فشار محوری است (برای مثال به جانسون و رید (Johnson & Reid) مراجعه شود)، گذشته از این مکانیزمی است که به لوله های اف آر پی بهم پیوسته شده با الیاف آرامید نرم نیز مربوط می شود. طبق بیان فارلی و جونز (Farley & Jones) معمولاً کربن ترد و فایبرگلاس سبب ایجاد تاخوردگی می شوند. بهر حال این تنها زمانی رخ می دهد که تنشهای بین صفحه ای به نسبت مقاومت ماتریس کمتر باشند و ماتریس تحت تنش بالا تغییر شکل پلاستیک از خود نشان می دهد.



شکل ۱. مکانیزم شکست و منحنی بار-جابجایی لوله اف آر پی (تاشدگی)

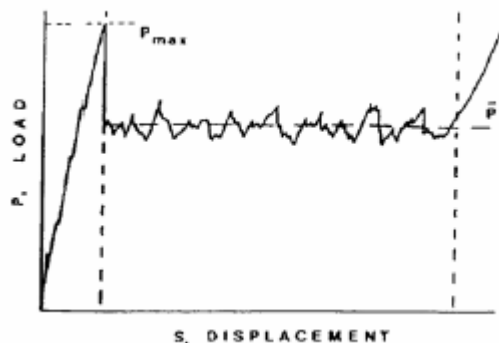
در منحنی بار-جابجایی نشان داده شده در شکل ۱ سه ناحیه مهم وجود دارد. در اینجا یک پاسخ اولیه خطی-الاستیک وجود دارد که در قله بار قبل از افت بار پایان می یابد. سپس به صورت یک سری از نوسانات اطراف تراز فشرده‌گی ادامه می یابد بطوریکه هر نوسان بیانگر یک تاخوردگی کامل در لوله می باشد. سرانجام زمانیکه لوله بطور کامل فشرده شد، بار به سرعت افزایش می یابد. به این علت که تمام طول واقعی لوله در این مود شکست بکار می رود، مقادیر قابل توجهی از انرژی نیز جذب می شود.

شکست ترد:

اغلب کربن و ترموست های تقویت شده فایبرگلاس تحت شکست ترد متلاشی می شوند. دیده شده که شکست کاتاستروپ ناپایدار یک قطعه قابل صرفنظر کردن است (برای مثال، استفاده از مکانیزم شکست ماشه). روی هم رفته مود شکست، یک پروسه شکست پایدار با ترازهای بالایی از جذب انرژی می باشد.

شکل ۲ بیانگر نمودار بار-جابجایی برای یک لوله اف آر پی در مدت شکست ترد پایدار می باشد. مشاهده می شود که نوسانات بار ظاهراً بطور تصادفی به صورت دندانه ای با دامنه کوتاه انجام می شود. طبق گفته هال (Hull)، دندانه ها مربوط به طبیعت stick-slip مکانیزم شکست ترد می باشند و تنشهای مورد نیاز برای آغاز رشد ترک بالاتر از این

تنشها برای گسترش آن هستند. همچنین در شکل ۲ مشاهده می شود که دامنه کوتاه دندانه ها ناشی از خواص منحنی بار- جابجایی می باشد که به حالت ایده آل کاملاً نزدیک است. پاسخ این واکنش دقیقاً یکنواختتر از پاسخ تولیدی توسط مکانیزم تاشدگی است که در نتیجه نوسانات بزرگتر بود.

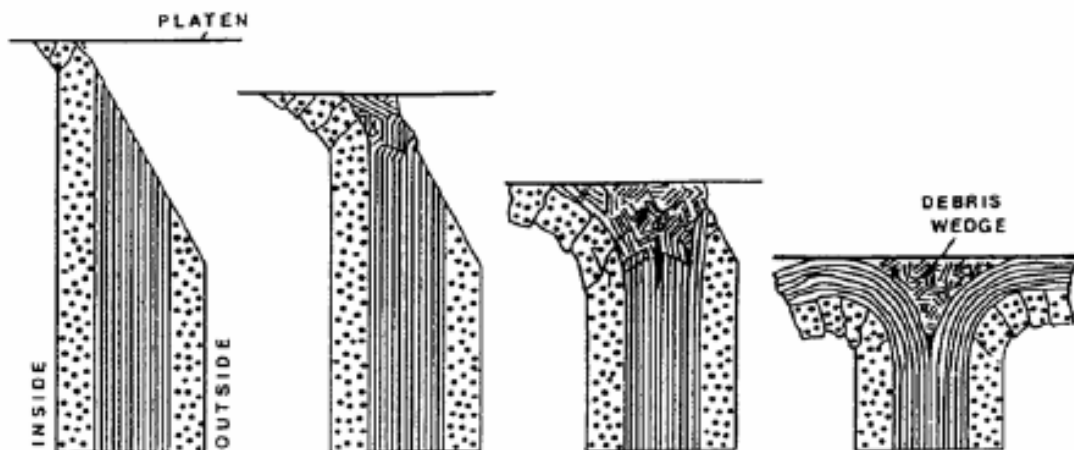


شکل ۲. منحنی بار- جابجایی لوله اف آر پی در مود شکست ترد پایدار

محققان متعددی تلاش کرده اند تا رفتار لوله های اف آر پی را تحت فشار محوری تهیه کنند که گویا هال و فارلی و جونز (Hull & Farley & Jones) اغلب رفتارهای کلی بدست آورده اند. همچنین محققان دو رفتار دیگر را برای اف آر پی ها در مورد تحمل شکست ترد مشاهده کرده اند که در اکثر نمونه ها ترکیبی از این دو دیده شده است. این دو رفتار توسط محققان خمش و برش عرضی اولیه نامیده شده اند و به صورت زیر بیان می شوند:

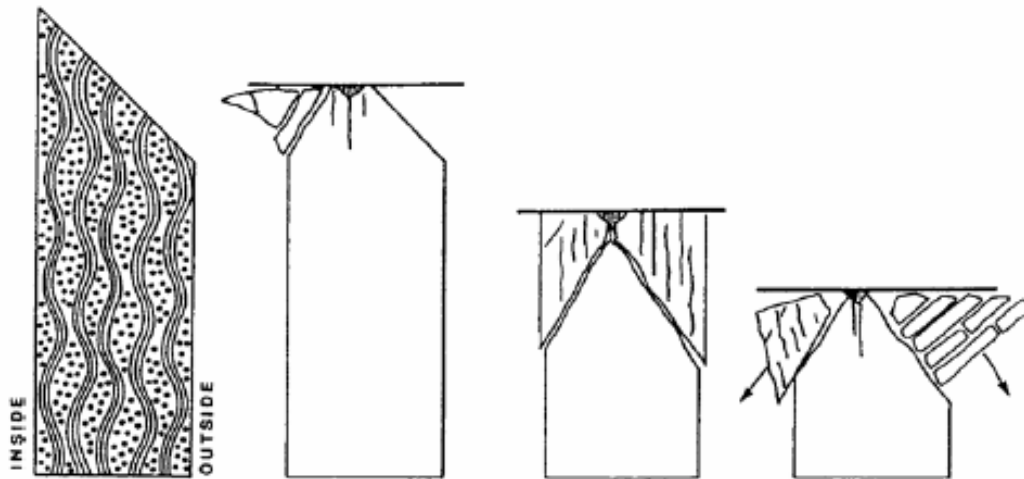
۱. **splaying** یا مود شکست خمشی ورق توسط ورق میانی بسیار طویل توصیف می شود. ورق میانی و الیاف موازی توسط مجموعه لایه های محوری به مقدار کم و نه در حد شکست ترک می خورند (شکل ۳). گسترش ترک، یک مکانیزم اصلی جذب انرژی است اگرچه انرژی غالباً بواسطه خمش لایه ها به خاطر اثرات اصطکاک جذب می شود.

۲. **fragmentation** یا مود شکست برشی عرضی توسط سطح ورق **wedge-shaped** مشخص می شود که با یک یا تعداد بیشتری لایه میانی کوتاه و ترکهای طولی مجموعه ورق ناتمام را شکل می دهند (شکل ۴).



شکل ۳. بیان شماتیک مود شکست خمشی ورق یا **splaying**

مقطع **wedge-shaped** در نتیجه توسعه ترکهای لایه میانی که سبب شکست در لبه های دیواره لوله می شوند، بوجود می آید. مکانیزم جذب انرژی اصلی، شکست مجموعه ورق به همراه توسعه ترک طولی و ورق میانی بعنوان دومین عامل می باشد. هال (Hull) پیشنهاد کرده است که برتری هر کدام از مودهای بالا در یک لوله با تحلیل میکرو مکانیزم شکست قابل تشخیص است که بسیار متأثر از توزیع الیاف داخل کامپوزیت می باشد. برای مثال هال (Hull) ثابت کرده است که لوله های اف آر پی با نسبت بالای الیاف **hoop** تمایل بیشتری برای شکست در مود - دارند تا از آنها که اکثریت الیافشان جهتدار محوری است و این به علت مقاومت الیاف **hoop** در جهت مخالف است.



شکل ۴. بیان شماتیک مود شکست برشی عرضی یا fragmentation

در مورد مودهای شکست ترد، برخی شواهد اشاره بر این دارد که معمولاً fragmentation انرژی بیشتری نسبت به splaying جذب می کند. طبق مشاهدات، گفته شده که fragmentation برای مقاومت برشی های بالا در مورد ورق میانی پدیدار می شود، در حالیکه splaying بیشتر در ارتباط با مقاومت برشی های کمتر مطرح می شود. در هر صورت به علت اختلاف زیاد بین مساحت های نواحی شکست بوجود آمده توسط دو مود شکست، عملکردها پیچیده تر می شود. از اشکال ۳ و ۴ می توان دریافت که مود شکست خمشی ورق به سمت ایجاد ناحیه شکست بزرگتر و همچنین پتانسیل بیشتر برای جذب انرژی در سطح نمونه به علت اصطکاک میل پیدا می کند. این بسیار با اهمیت است که جذب انرژی بالا تنها زمانی اتفاق خواهد افتاد که لوله اف آر پی به صورت پایدار و به روش تصاعدی فشرده شود. بهر حال، فارلی و جونز (Farley & Jones) اشاره کرده اند که تمام لوله ها بدین روش فشرده نمی شوند. باید از فشردگی پایدار در برخی روشها جلوگیری کرد که در نتیجه شکست ناپایدار کاتاستروپیک با سطح انرژی کمتر رخ می دهد. در بعضی مثالها، حالات به سمت شکست کاتاستروپیک سوق پیدا می کند که شامل گسترش ناپایدار ترک در مود خمشی لایه و محدودیت ترکهای لایه میانی در مود برش عرضی است.



تأثیر جنس الیاف و ماتریس

اکثر مطالعات بر روی مواد کامپوزیت در زمینه جذب انرژی اف آر پی های شامل کربن و شیشه یا الیاف آرامید در رزین ترموست مانند اپوکسی، پلی استر، وینیل استر و یا پنولیک می باشد. این مبحث به اثر جنس الیاف و ماتریس بر قابلیت جذب انرژی توسط لوله های اف آر پی می پردازد.

جنس الیاف

فارلی و ترنتون و ویکلیف و اشموزر (Schmueser & Wickcliffe & Thornton & Farley) همگی گفته اند که در آزمایشهای مربوط به رفتار مدلهای قابل قیاس، لوله های دارای الیاف کربن مسطح معمولاً به نسبت بیشتری از الیاف شیشه و آرامید دارای جذب انرژی ویژه می باشند. این مشاهدات توسط داده های عددی جدول ۱ تأیید می شوند. علت این امر هم به خواص فیزیکی الیاف و استحکام بین ماتریس و الیاف و مکانیزم شکست سراسری اف آر پی بستگی دارد. مشخصات فیزیکی انواع مختلف الیاف در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می شود که جذب انرژی ویژه بالای الیاف کربن در کامپوزیتها را می توان تقریباً بدلیل چگالی کم و استحکام بالای الیاف کربن تشکیل دهنده آن دانست.

جدول ۲. خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف

Fibre	Density (kg/m ³)	Axial Young's Modulus (GN/m ²)	Tensile Strength (MN/m ²)
Carbon Fibre (High Modulus)	1950	380	2400
Carbon Fibre (High Strength)	1750	230	3400
Glass Fibre (E-Glass)	2560	76	2000
Aramid Fibre (Kevlar 49)	1450	130	3000



دو دلیل عمده برای جذب انرژی ویژه کمتر الیاف آرامید نسبت به الیاف کربن وجود دارد. اول اینکه استحکام فشاری الیاف آرامید فقط حدود ۰,۲ استحکام فشاری الیاف کربن است (طبق جدول ۲). ثانیاً طبیعت نرم الیاف آرامید به سمت شکست در مکانیزم تاخوردگی سوق پیدا می کند و در این حالت انرژی مؤثر کمتری به نسبت شکست ترد جذب میکند. گذشته از این دوری (Dorey) بیان کرده است که می توان استحکام بین الیاف و ماتریس در الیاف کربن را با توجه به عملکرد سطح الیاف بهینه کرد. یک چنین بهینه سازی برای الیاف شیشه و آرامید امکانپذیر نیست. در زمینه کوششهایی که تاکنون برای افزایش استحکام صورت پذیرفته، اثرات عملکرد سطوح الیاف مختلف در زمینه قابلیت جذب انرژی در الیاف شیشه توسط هامادا (Hamada) و تا حدودی تائو (Tao) مورد ارزیابی قرار گرفته است. هر دوی این محققان بیان کرده اند که اثرات سطح که معمولاً باعث افزایش استحکام بین الیاف و ماتریس می شود سبب طبیعی تر شدن جذب انرژی نیز می شود.

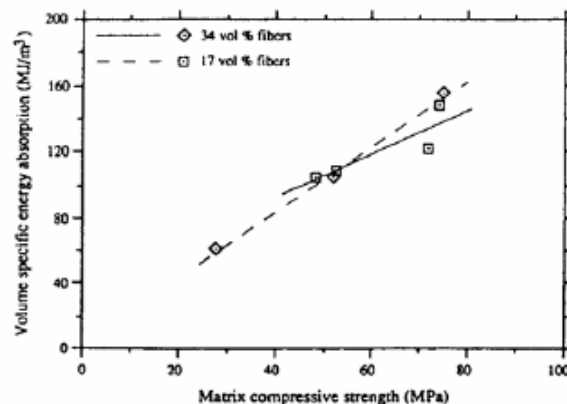
جنس ماتریس

ترنتون و جریان (Thornton & Jeryan) اعلام کرده اند که انرژی جذب شده ویژه تابعی خطی از استحکام کششی و مدول کششی رزین ماتریس است و برای لوله های فایبرگلاس، به ترتیب همراه فنولیک و پلی استر و اپوکسی افزایش می یابد. در حالیکه داده های مربوط به جدول ۳ هنوز به دلیل پراکندگی داده های گزارش شده، توسط مرجعی واحد مورد تأیید قرار نگرفته است.

جدول ۳. خواص مکانیکی انواع رزین ماتریس

Fibre	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (GN/m ²)	Tensile Strength (MN/m ²)
Epoxy	1100 - 1400	2.1 - 6.0	35 - 90
Polyester	1100 - 1500	1.3 - 4.5	45 - 85
Phenolic	1300	4.4	50 - 60

تحقیقات گسترده ای توسط تائو (Tao) در زمینه تأثیر خواص ماتریس بر قابلیت جذب انرژی اف آر پی ها بر اساس خواص له شدگی میله های فایبرگلاس وینیل استر صورت گرفته است. با ایجاد تغییراتی در مراحل ساخت، نمونه هایی تولید شد که دارای ماتریسهایی با استحکام فشاری متفاوت بودند. در شکل ۵ دیده می شود که انرژی جذب شده در واحد حجم به طور خطی با استحکام فشاری ماتریس افزایش می یابد.



شکل ۵. تأثیر استحکام ناشدگی ماتریس بر جذب انرژی ویژه میله های فایبرگلاس وینیل استر

هامادا (Hamada) ادعا کرده که توانسته بیشترین جذب انرژی ویژه برای هر اف آر پی را با استفاده از ماتریس polyetheretherketone (PEEK) و الیاف کربن بدست آورد. مقدار ثبت شده برابر 225 kJ/kg است که بیشتر از دو برابر مقدار بدست آمده برای کامپوزیت کربن - اپوکسی می باشد. این به طاقست شکست بالای ماتریس PEEK که از توسعه شکست جلوگیری می کند نسبت داده می شود. تعداد زیادی از الیاف در ناحیه برخورد دچار شکست شده اند و شکافهای زیادی نیز به علت شکست در مود splaying در قسمت جلو بوجود آمده اند.



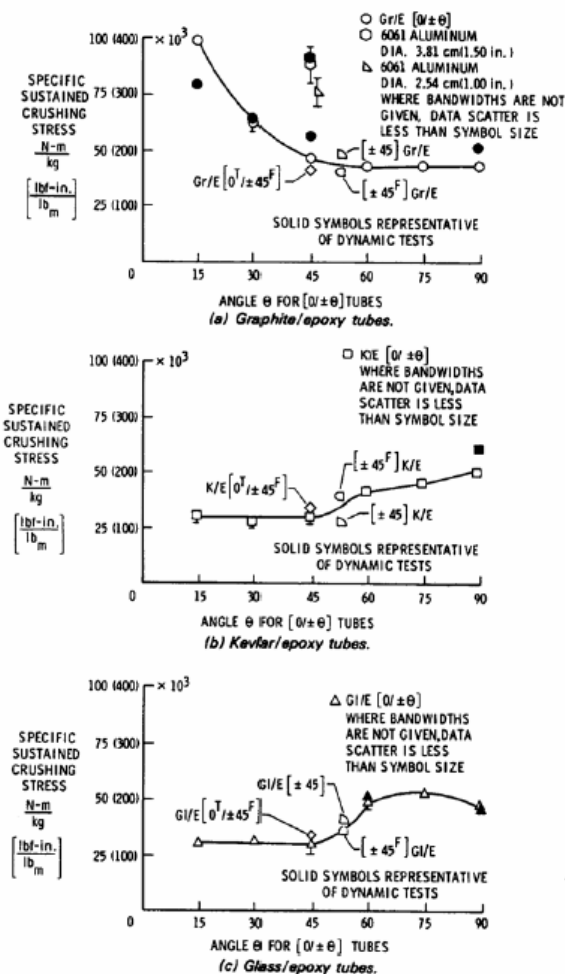
ترکیب الیاف و ماتریس

توضیحاتی که در بالا بیان شد، بازگو کننده وابستگی قابلیت جذب انرژی اف آر پی ها به خواص منحصر بفرد مربوط به ماتریسها و الیاف تشکیل دهنده آنها می باشد. فارلی (Farley) وضعیت دیگری را پذیرفته و پیشنهاد کرده است که جذب انرژی اساساً وابسته به خواص نسبی (و نه کامل) ماتریس و الیاف است. خصوصاً اینکه او تأثیر مقادیر نسبی کرنش شکست ماتریس و الیاف را بر انرژی جذب شده گزارش کرده است. همچنین پیشنهاد شده است که برای رسیدن به بیشینه جذب انرژی از اف آر پی ها، از ماتریس با کرنش شکست بالاتر از الیاف تقویت شده استفاده شود و این احتمال جذب انرژی بیشتر را در برخورد افزایش می دهد.

تأثیر جهت الیاف

سازه های کامپوزیتی با کارایی بالا اغلب شامل لایه هایی از اف آر پی دارای جهت یکسان می باشند که به ترتیبی مشخص برای ایجاد ساختار ورقه ای انباشته شده اند. بعلاوه، جهت گیری (نسبت به هرگونه بارگذاری) الیاف در لایه مفروض و جهت گیری نسبی لایه های متوالی درون ورق می تواند بر خواص مکانیکی سازه تأثیر قابل توجهی بگذارد. فارلی (Farley) گفته است که قابلیت جذب انرژی با تغییر جهت لایه ها دچار دگرگونی می شود. تغییرات قابل توجهی در انرژی جذب شده ویژه در آزمایش لوله های کربن / اپوکسی $3 [0 \pm \theta]$ برای $15 < \theta < 45$ مشاهده می شود (شکل 6a) و جذب انرژی ویژه در این محدوده به طور مشخصی دچار افت می شود. می توان گفت که الیاف کربن با تمایل به جهت گیری در راستای بارگذاری انرژی بیشتری جذب می کنند. بهر حال، هال (Hull) عنوان کرده که در مورد ورقه با جهت گیری الیاف صفر درجه نمی توان گفت که قابلیت جذب انرژی قابل قبولی دارد. خصوصاً فقدان یک لایه حلقوی خارجی در لوله های ورقه ای می تواند منجر به جذب انرژی ناچیزی شود و این به علت گرایش بیش از حد شکافهای طولی در جدایی لایه های خارجی است.

تغییرات ناچیزی در قابلیت جذب انرژی برای لوله های آرامید/ اپوکسی $[0/\pm\theta]_3$ توسط فارلی (Farley) گزارش شده است (شکل 6b). انرژی جذب شده ویژه با افزایش θ در محدوده $90 > \theta > 45$ افزایش می یابد و در محدوده $45 > \theta > 15$ تغییر چندانی وجود ندارد و این بر خلاف چیزی است که برای لوله های کربن/ اپوکسی مشاهده شد. پس می توان گفت که الیاف طولی تأثیر کمتری بر قابلیت جذب انرژی لوله های اف آر پی که تحت مکانیزم تاشدگی دچار شکست می شوند، دارند. در حالیکه الیاف حلقه ای نقش بسیار مهمتری را ایفاء می کنند. هم هال (Hull) و هم فارلی (Farley) بنابر آزمایشهایی که انجام داده اند، عنوان کرده اند که انرژی جذب شده برای الیاف با زاویه بین $65-75$ درجه بیشینه می شود (شکل 6c). پایین لایه گذاری لوله ها در محدوده انرژی بالاتری دچار شکست ترد می شوند.



شکل ۶. تأثیر لایه گذاری الیاف بر قابلیت جذب انرژی لوله های اف آر پی



در زوایای کمتر از این مود انرژی *splaying* کمتری مشاهده شده است و در زوایای بالاتر، برش میان دیواره ها سبب می شود لایه ها به دلیل نوسانات بزرگ در منحنی بار-جابجایی دچار شکست شده و جدا شوند. براساس مشاهدات بالا می توان گفت که یک رابطه طبیعی میان جهت گیری لایه ها و جذب انرژی وجود دارد که به جنس ماده بستگی دارد. فارلی (Farley) اظهار داشته که این می تواند به کرنشهای شکست نسبی میان الیاف و ماتریس نسبت داده شود، در نتیجه مستقیماً می تواند در پایداری (و جذب انرژی) مکانیزم له شدگی مؤثر باشد. برای مثال، طبق شکل 6a کرنش شکست الیاف کربن کمتر از مقدار آن برای ماتریس اپوکسی است. بنابراین، ماتریس یک درجه پایداری را فراهم می کند. کاهش در جذب انرژی در نتیجه افزایش θ در محدوده $45 < \theta < 15$ به علت کاهش استحکام ورق می باشد. برعکس، کرنش شکست الیاف شیشه و آرامید در شکل‌های 6b و 6c بیشتر از مقدار آن برای ماتریس اپوکسی است. در نتیجه ماتریس زودتر می شکند و زمینه پایداری کمتری را بوجود می آورد و در عوض، پایداری توسط الیاف حلقوی ایجاد شده و با افزایش θ ، جذب انرژی نیز افزایش می یابد.

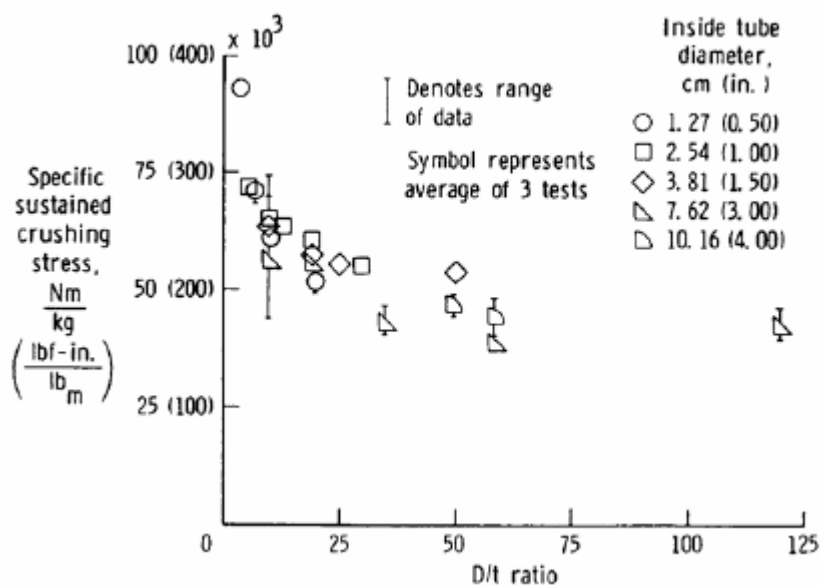
تأثیر هندسه جسم

مباحث گذشته بر چگونگی تأثیر ساختمان داخلی یک اف آر پی (شامل الیاف و ماتریس) در قابلیت جذب انرژی تمرکز داشت. بهر حال، ساختار ماکروسکوپی یک اف آر پی (شامل هندسه کل آن) نیز مؤلفه ای است که بر جذب انرژی تأثیر می گذارد. بنابراین در این قسمت، فاکتورهای عمده هندسی که بر قابلیت های جذب انرژی لوله های اف آر پی تحت فشار محوری تأثیر گذارند مورد بررسی قرار می گیرند.

نسبت قطر داخلی به ضخامت دیواره

فارلی (Farley) بیان داشته است که قابلیت جذب انرژی یک تابع غیر خطی از نسبت قطر داخلی به ضخامت دیواره (d/t) برای لوله های کربن/ اپوکسی و آرامید/ اپوکسی می باشد. همچنین توسط فارلی و جونز (Farley & Jones) تأیید شده است که انرژی جذب شده ویژه با افزایش این نسبت کاهش می یابد (شکل ۷). فارلی (Farley) علت این امر

را به افزایش متناظر طول و تعداد ترکهای لایه میانی که سبب کاهش استحکام شکست معمولی ورق می شوند، نسبت می دهد.

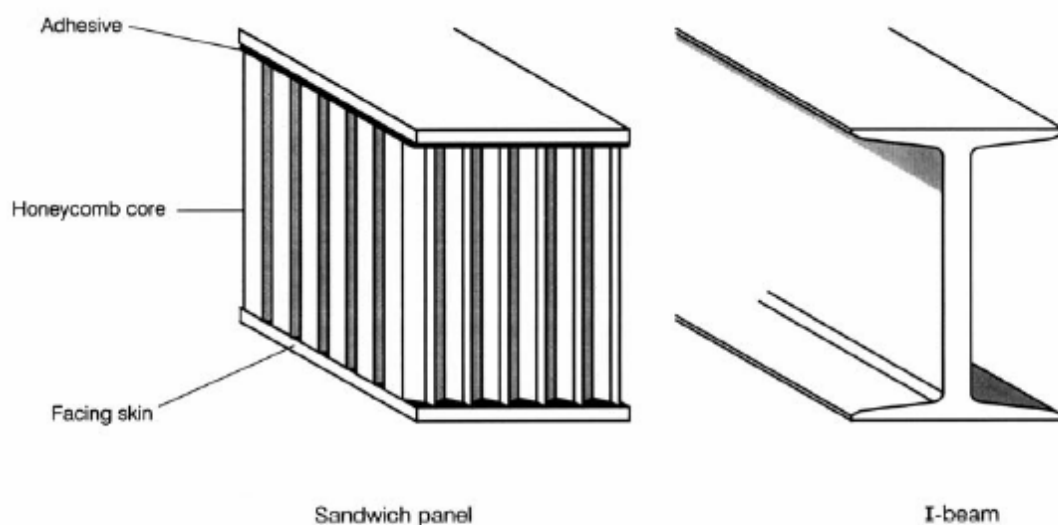


شکل ۷. تأثیر نسبت قطر داخلی به ضخامت دیواره در جذب انرژی ویژه برای لوله های کربن / اپوکسی

قابلیت جذب انرژی در لانه زنبوری ها، فومها و ساختارهای ساندویچی

در بخش قبل قابلیت جذب انرژی اف آر پی ها بررسی شد که تنها یک گروه از مواد کامپوزیتی بود. در اینجا به دسته دیگری از کامپوزیتهای رسیدگی می شود و آن ساختارهای ساندویچی است.

ساختارهای ساندویچی که معمولاً شامل یک فوم یا یک لانه زنبوری بعنوان هسته بین دو صفحه نازک می باشند دارای این پتانسیل هستند که مقدار قابل توجهی از انرژی برخورد را پراکنده کنند. این کار می تواند به طور کامل از طریق فشردگی موضعی هسته به همراه تغییر شکل سراسری پانل حاصل شود. گذشته از این، در مقایسه خواص مکانیکی آنها و تیرهای I شکل (شکل ۸)، پانلهای ساندویچی می توانند طوری طراحی شوند که دارای استحکام و سفتی مورد نیاز برای استفاده در سازه ها باشند.



شکل ۸. مقایسه پانل ساندویچی و تیر I شکل

صفحات جانبی پانل ساندویچی بعنوان بالهای تیر I شکل عمل می کنند که تنشهای خمشی را تحمل می کنند. درحالیکه هسته پانل ساندویچی مانند جان تیر عمل کرده و در برابر تنشهای برشی مقاومت می کنند. در معرفی کلی مکانیک پانلهای ساندویچی، خصوصاً در رابطه با کمانش و خمش ناشی از آن، توسط آلن و پلانتما (Allen & Plantema) کارهایی صورت گرفته است. بعلاوه، روشهای ساخت پانلهای ساندویچی نیز توسط کارلسون و استروم (Karlsson & Åström) مطرح شده است.

این مبحث به بررسی پارامترهای مؤثر بر قابلیت جذب انرژی پانلهای ساندویچی می پردازد. نقش هسته و صفحات جانبی نیز به علت تأثیر درهندسه پانل و شرایط آزمایش بررسی می شوند.

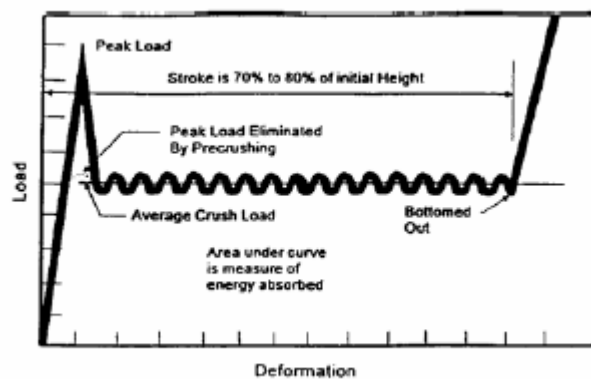
نقش هسته

طبق بیان آلن (Allen)، هسته یک پانل ساندویچی چندین وظیفه مهم دارد و باید به اندازه کافی در جهت عمود بر صفحات جانبی سفت باشد تا اطمینان حاصل شود که آنها در کاربردهای عادی سالم می مانند. همچنین باید در برابر برش به اندازه کافی سفت باشند تا اطمینان حاصل شود که وقتی پانل خم شد صفحات بیش از اندازه روی یکدیگر سر

نخورند. در نهایت برای جلوگیری از چروکیدگی صفحات جانبی، هسته باید به اندازه کافی سفت باشد تا صفحات تقریباً مسطح بمانند. هسته های پانل ساندویچی عموماً می توانند شامل لانه زنبوری ها و فومها باشند. اگرچه پانلهای براساس الیاف پارچه ای سه بعدی نیز امروزه در دسترس می باشند. تمام انواع این هسته ها در زیر توضیح داده می شوند:

لانه زنبوری ها

مجازاً هر ماده ورقه ای نازک می تواند به شکل مناسبی فرم داده شده و یک ساختار لانه زنبوری را تولید کند. یک لانه زنبوری معین بوسیله ماده اولیه و نیز هندسه و ضخامت دیواره سلولهایش مشخص خواهد شد. گلداسمیت و سکمن (Goldsmith & Sackman) گزارش داده اند که در آزمایشهای برخورد جانبی شبه استاتیک بر روی لانه زنبوری های شش ضلعی، می توان جذب انرژی ویژه آلومینیم و نومکس را مقایسه کرد. همچنین بانداک و بیتزر و پورتر (Bandak & Bitzer and Porter) تأیید کرده اند که منحنی بار-جابجایی لانه زنبوری های شش ضلعی یکنواخت است. از شکل ۹ می توان مشاهده کرد که جدای از قله اولیه، هسته های لانه زنبوری با هندسه شش ضلعی نسبتاً جذب انرژی ایده آل نزدیک شده اند. مکانیزم شکست هر سلول در لانه زنبوری معمولاً تاخوردگی تصاعدی است و یک لانه زنبوری را می توان بصورت ردیفی از لوله ها فرض نمود.



شکل ۹. نمودار بار-جابجایی لانه زنبوری تحت برخورد جانبی



به این علت که فشردگی لانه زنبوری ها به شکل منظم صورت می گیرد، محققان فرمولهای نسبتاً دقیقی در توصیف رفتار لهیدگی آنها ارائه کرده اند. معادله ۱ تخمین نیمه تجربی مک فارلند (McFarland) برای تنش لهیدگی متوسط یک سلول شش ضلعی می باشد. مشاهدات ارتباط مطلوب بین داده های بدست آمده تجربی برای لانه زنبوری های آلومینیمی را ثابت می کند.

$$\bar{\sigma} = \sigma_{YS} \frac{t^2}{S^2} \left[\frac{4.750}{K} + 28.628 \right] + 1.155 \tau_{YS} \frac{t}{S} \quad (1)$$

که در آن σ تنش متوسط لهیدگی، σ_{YS} تنش تسلیم ماده، τ_{YS} تنش تسلیم برشی ماده، t ضخامت دیواره سلول، S قطر کوچک سلول و K پارامتری برای توصیف هندسه کمانش می باشد. بهر حال، ویرزبیک (Wierzbicki) ادعا کرده که رابطه دقیقتری بدست آورده که می تواند ارتباط مطلوبتری با داده های تجربی در محدوده وسیعی از پارامترهای هندسی برقرار کند.

$$\bar{\sigma} = 16.56 \sigma_0 \left(\frac{t}{S} \right)^{5/3} \quad (2)$$

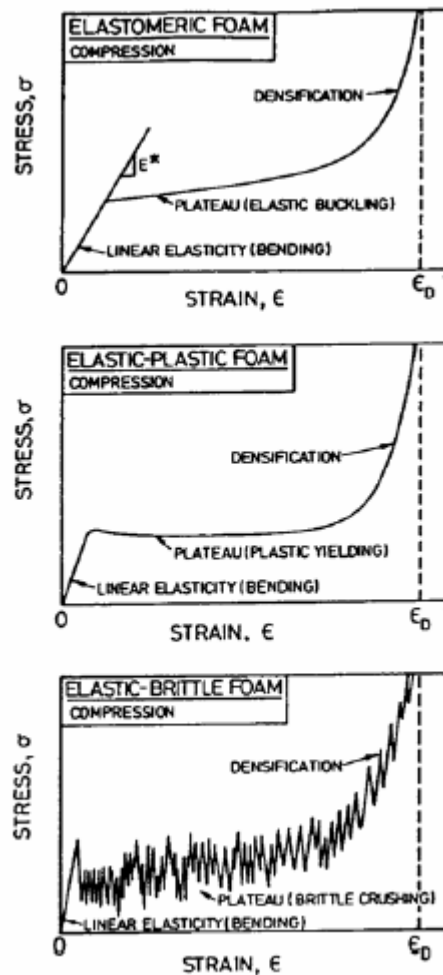
که در آن σ_0 جریان تنش ماده (متوسط بین تنش تسلیم و تنش نهایی) می باشد.

فومها

تعداد بسیاری از مواد از جمله فومها وجود دارند که شامل پلیمرها، فلزات، سرامیکها و شیشه ها می باشند. فومها معمولاً به شکل مواد با چگالی نسبی کمتر از ۰,۳ شامل سوراخهای ریز می باشند. تشریح مکانیزم فومها توسط گیبسون و اشبی (Gibson & Ashby) به صورت مناسبی ارائه شده است:

فومها با توجه به طبیعتشان بیان کننده مکانیزمهای تغییر شکل و مراحل جذب انرژی گوناگون می باشند. در شکل ۱۰ منحنی های تنش- کرنش برای برخی رده های مختلف فوم نشان داده شده است. فاکتورهای اصلی که قابلیت جذب انرژی توسط فوم تحت فشار را کنترل می کنند عبارتند از:

- چگالی نسبی فوم
- توزیع مواد درون فوم (مانند هندسه سلول)
- طبیعت تغییر شکل دیواره های سلول (الاستیک، پلاستیک و یا ترد)
- فشار یا جریان سیال داخل سلولها
- اینکه سلولها باز و یا بسته باشند.



شکل ۱۰. منحنی تنش- کرنش برای انواع مختلف فوم

معمولاً فومهای پلیمری ویژگیهای جذب انرژی بسیار خوبی دارند. آنها سبک هستند و همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است منحنی بار- جابجایی غالباً یکنواختی دارند و نسبت به لانه زنبوری ها ایزوتروپتر می باشند.



گذشته از اینها، برخی محققان در زمینه اثرات پرکردن قسمتهای میان تهی داخلی توسط فوم در جهت بهبود قابلیت جذب انرژی آنها مطالعاتی داشته اند. ترنتون (Thornton) اعلام کرده است که پر کردن بوسیله فومها می تواند اثرات سودمندی بر مود شکست سراسری لوله های اف آر پی داشته باشد. این به علت گرایش به افزایش پایداری له شدگی است. بهرحال، برای شکست پایدار، افزایش نسبی در جرم بواسطه خاصیت فوم بیشتر از افزایش نسبی در جذب انرژی است. بنابراین، لوله های اف آر پی با فوم پر شده معمولاً جذب انرژی ویژه کمتری نسبت به نوع پرنشده دارند. این مفاهیم عموماً توسط کرش و یانل (Kirsch & Jahnle) تأیید شده است ولی براچس و داگلاس (Brachos & Douglas) با آن مخالف هستند. محققان آخری گزارش کرده اند که افزایش جذب انرژی ویژه در نتیجه پرکردن لوله های اف آر پی با فوم است. بنابراین به نظر می رسد که تأثیر پرکردن با فوم بر جذب انرژی سازه های اف آر پی به خواص ویژه مواد تشکیل دهنده آنها بستگی خواهد داشت.

الیاف پارچه ای سه بعدی

پانلهای ساندویچی مرسوم معمولاً نیازمند اتصال شیمیایی بین هسته و پوسته ها می باشند. این می تواند سبب افزایش مسائلی مانند کاهش چسبندگی بین هسته و پوسته شود. یک راه برای اجتناب از چنین مشکلاتی همزمانی بافتن الیاف پوسته با رفت و آمد عمودی برای ایجاد یک ساختار سه بعدی (شکل ۱۱) است. این سازه را می توان با رزین اشباع و یک پانل ساندویچی کامل را ایجاد کرد.



شکل ۱۱. شمای الیاف پارچه ای سه بعدی



آلبا و میراوت (Alba & Miravete) توسعه برخی سازه ها را بعنوان بخشی از پروژه AFICOSS Brite Euram بیان کرده اند. با توجه به شباهت رفتار مکانیکی آنها با انواع کلاسیک ساندویچ، تحلیل و پیشگویی کارایی آنها راحت است. گذشته از این، ادعا شده که برخی سازه ها برای استفاده بعنوان مقاطع جاذب انرژی مناسب می باشند، اگرچه طی این بررسی دلایلی که این ادعا را ثابت کند وجود ندارد.

نقش صفحات جانبی

گلداسمیت و سکمن (Goldsmith & Sackman) گزارش کرده اند که صفحات جانبی یک پانل ساندویچی نقش عمده‌ای در قابلیت جذب انرژی سراسری آن دارند. به عبارت دیگر، قابلیت جذب انرژی یک پانل ساندویچی معمولاً بیشتر از مقدار آن برای ماده هسته به تنهایی می باشد. این به تغییر شکل پلاستیک صفحات جانبی و به توزیع بار آنها در منطقه هسته نسبت داده می شود.

مواد مختلفی برای استفاده بعنوان صفحات جانبی مناسب می باشند. گلداسمیت و سکمن (Goldsmith & Sackman) یافته اند که سازه های با صفحات جانبی آلومینیمی اساساً قابلیت جذب انرژی و نیروی له شدگی جانبی شبه استاتیک بیشتری نسبت به سازه های با صفحات غیر فلزی مانند فایبرگلاس، پلی کربنات و butadiene styrene acrylonitrile (ABS) دارند. عملکرد تمام صفحات غیر فلزی آزمایش شده نیز بدین صورت بوده است. همچنین این دو محقق اعلام کرده اند که ضخامت صفحات جانبی یک پانل ساندویچی، می تواند بر قابلیت جذب انرژی آن تحت فشار جانبی تأثیرگذار باشد. یک صفحه جانبی با ضخامت بسیار کم در انتقال بار به هسته در مجاورت ناحیه تماس فوری ضعیف خواهد بود. این ناشی از استفاده غیر مؤثر از ماده مجاور هسته می باشد. علاوه بر این، درحالیکه صفحات جانبی ضخیم سبب افزایش ناچیزی در سطح انرژی له شدگی می شوند، اثر آنها بر جذب انرژی آشکارا کاهش می یابد. در آزمایش شبه استاتیک، محققان افزایش در جذب انرژی را برای سلولهای لانه زنبوری با ضخامت $1/8$ و نیز کاهش ناچیزی را برای سلولهای با ضخامت $1/4$ نشان دادند. دلیل این امر غیر متعارف کاملاً واضح نیست. تحت بارگذاری دینامیکی برای درصد یکسانی از له شدگی نیز، صفحات جانبی ضخیم معمولاً درصد جذب انرژی بالاتری دارند.



تأثیر اتصال بین هسته و صفحات جانبی

صفحات جانبی یک پانل ساندویچی معمولاً با اتصال چسبی به هسته متصل می شوند. گلداسمیت و سکمن (Goldsmith & Sackman) همچنین تأثیر استحکام اتصال بین هسته و پوسته را بر جذب انرژی مورد بررسی قرار داده اند. در حالیکه ساختارهای با اتصال ضعیف جذب انرژی تقریباً مشابه حالت عادی دارند، پیشگویی در حالت کلی غیر ممکن است. گذشته از این، نمونه های با اتصال ضعیف قابلیت تحمل بار کمتری دارند.

تأثیر ابعاد نمونه

در آزمایشهای انجام شده توسط گلداسمیت و سکمن (Goldsmith & Sackman)، نمونه های لانه زنبوری بزرگتر دارای استحکام له شدگی بالاتر و جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه های با ابعاد کمتر هستند که منبع جذب این انرژی فوق العاده برش هسته پیرامون ناحیه فشرده شده است.

تأثیر انواع تکیه گاه

گلداسمیت و سکمن (Goldsmith & Sackman) آزمایش های فشار جانبی را بر روی نمونه های گیردار (که در آن صفحه جانبی در مقابل تغییر شکل محافظت می شود) و نمونه های با تکیه گاه ساده انجام داده اند. تفاوت های زیادی با در نظر گرفتن این شرایط مرزی بوجود می آید. قله نیرو برای نمونه های گیردار تقریباً دو برابر مقدار آن برای نمونه های با تکیه گاه ساده می باشد. در حالیکه ماکزیمم جابجایی در نوع دوم دو برابر اولی است. بعلاوه، نوع تکیه گاه بر مکانیزم جذب انرژی نیز تأثیرگذار است. برای نمونه های گیردار، اکثریت جذب انرژی از فشردگی هسته و نیز خمش و کشش صفحه جانبی تحت فشار بدست می آید. بهرحال، نمونه های ساده معمولاً فشردگی هسته کمتری دارند و انرژی زیادی در اثر تغییر شکل سراسری پانل ساندویچی جذب می کنند. اکثر مطالعات در زمینه قابلیت جذب انرژی پانلهای ساندویچی بر روی نمونه های تحت بارگذاری جانبی متمرکز شده است و نسبتاً توجه کمتری به رفتار ساختارهای ساندویچی تحت فشار محوری شده است.



تأثیر نرخ کرنش

معمولاً قابلیت جذب انرژی فومها و لانه زنبوری ها با نرخ کرنش افزایش می یابد. بعنوان مثال، گیبسون و اشبی (Gibson & Ashby) گزارش کرده اند که استحکام تسلیم و شکست سطحی فومهای پلیمر با نرخ کرنش افزایش می یابد. بنابراین، انتظار می رود که قابلیت جذب انرژی نیز زیاد شود. درستی و تفسیر تأثیرات نرخ کرنش بر ساختارهای ساندویچی عمدتاً به جهت بارگذاری بستگی دارد. تحت بارگذاری جانبی، هسته فشار بیشتری را تحمل می کند درحالیکه، در بارگذاری لبه ای صفحات جانبی نقش مهمتری را ایفاء می کنند. در نتیجه تأثیر نرخ کرنش، تابعی از صفحات جانبی و هسته و اتصال بین این دو می باشد.

نتایج

بررسی موجود بر خواص جذب انرژی دو گروه از مواد کامپوزیتی شامل اف آر پی ها و ساختارهای ساندویچی تأکید دارد. نشان داده شد که اف آر پی ها می توانند طوری طراحی شوند که جذب انرژی بالاتری نسبت به فلزات داشته باشند. امروزه محققانی که در این زمینه فعالیت می کنند، مفاهیم اساسی را در مورد تأثیر مکانیزمهای شکست تحت فشار، الیاف اصلی و ماتریس، طراحی ورق و هندسه نمونه در قابلیت جذب انرژی المانهای لوله ای بنا نهاده اند. به همین نحو، ساختارهای ساندویچی عنوان شدند که می توانند پتانسیل جذب انرژی قابل توجهی داشته باشند. انرژی می تواند به صورت مؤثری بواسطه فشردگی مقطعی هسته و تغییر شکل سرتاسری یک پانل جذب شود. همینطور نشان داده شد که قابلیت جذب انرژی بطور گسترده ای توسط طبیعت هسته، صفحات جانبی و روش اتصال مورد استفاده و نیز هندسه و شرایط تکیه گاهی کنترل می شود.



منابع و مأخذ

1. MATTHEWS, F.L. & RAWLINS, R.D., *Composite Materials: Engineering & Science*, Chapman & Hall, London, (1994).
2. HULL, D. & CLYNE, T.W., *An Introduction to Composite Materials*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, (1996).
3. FARLEY, G.L., “**Energy Absorption of Composite Materials**”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 267-279, (1983).
4. FARLEY, G.L., “**The Effects of Crushing Speed on the Energy-Absorption Capability of Composite Tubes**”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, pp. 1314-1329, (1991).
5. LIN, K.H. & MASE, G.T., “**An Assessment of Add-on Energy Absorption Devices for Vehicle Crashworthiness**”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 112, pp. 406-411, (1990).
6. HULL, D., “**A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes**”, *Composites Science & Technology*, Vol. 40, pp. 377-421, (1991).
7. JOHNSON, W. & REID, S.R., “**Metallic Energy Dissipating Systems**”, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 31, No. 3, pp. 277-288, (1978).
8. THORNTON, P.H. & EDWARDS, P.J., “**Energy Absorption in Composite Tubes**”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, pp. 521-545, (1982)
9. FARLEY, G.L. & JONES, R.M., “**Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes**”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 37-50, (1992).
10. HAMADA, H., COPPOLA, J.C. & HULL, D., “**Effect of Surface Treatment on Crushing Behaviour of Glass Cloth / Epoxy Composite Tubes**”, *Composites*, Vol. 23, No. 2, pp. 93-99, (1992).
11. SCHMUESER, D. & WICKLIFFE, L.E., “**Impact Energy Absorption of Continuous Fibre Composite Tubes**”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 109, pp. 72-77, (1987).



12. DOREY, G., “**Impact and Crashworthiness of Composite Structures**”, *Structural Impact and Crashworthiness*, Ed. DAVIES, G.A.O., Vol. 1, pp. 155-192, Elsevier Applied Science Publishers, London, (1984).
13. TAO, W.H., ROBERTSON, R.E. & THORNTON, P.H., “**Effects of Material Properties and Crush Conditions on the Crush Energy Absorption of Fiber Composite Rods**”, *Composites Science and Technology*, Vol. 47, pp. 405-418, (1993).
14. ALLEN, H.G., *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Pergamon Press, Oxford,(1969).
15. PLANTEMA, F.J., *Sandwich Constructions: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells*, John Wiley & Sons, New York, (1966).
16. KARLSSON, K.F. & ÅSTRÖM, B.T., “**Manufacturing and Applications of Structural Sandwich Components**”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28A, pp. 97-111, (1997).
17. GOLDSMITH, W. & SACKMAN, J.L., “**Energy Absorption by Sandwich Plates: A Topic in Crashworthiness**”, *Crashworthiness & Occupant Protection in Transportation Systems*, AMD-Vol.126 / BED-Vol. 19, pp. 1-30, American Society of Mechanical Engineers, (1991).
18. GOLDSMITH, W. & SACKMAN, J.L., “**An Experimental Study of Energy Absorption in Impact on Sandwich Plates**”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 241-262,(1992).
19. BANDAK, M. & BITZER, T., “**Honeycomb, A Lightweight Energy Absorbing Material**”, *Proceedings of the 22nd International SAMPE Technical Conference*, pp. 1250-1263, (1990).
20. PORTER, J.H., “**Utilizing the Crushing Under Load Properties of Polypropylene and Polyethylene Honeycomb to Manage Crush Energy**”, SAE Paper No. 940877, (1994).
21. McFARLAND, R.K., “**Hexagonal Cell Structures Under Post-Buckling Axial Load**”, *AAIA Journal*, Vol. 1, No. 6, pp. 1380-1385, (1963).



22. WIERZBICKI, T., “**Crushing Analysis of Metal Honeycombs**”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 157-174, (1983).
23. GIBSON, L.J. & ASHBY, M.F., *Cellular Solids: Structure & Properties*, Pergamon Press, Oxford, (1988).
24. KIRSCH, P.A. & JAHNLE, H.A., “**Energy Absorption of Glass Polyester Structures**”, SAE Paper No. 81023, (1981).
25. BRACHOS, V. & DOUGLAS, C.D., “**Energy Absorption Characteristics of Hybrid Composite Structures**”, *Proceedings of the 27th International SAMPE Technical Conference*, pp. 421-435,(1995).
26. ALBA, J.J. & MIRAVETE, A., “**Three-Dimensional Woven Glass Fabrics**”, *Advanced Materials*, Vol. 7, No. 2, pp. 194-197, (1995).

Archive of SID