



بهره گیری از فناوری سیستم های حفاظت حرارتی با بافت سه بعدی در ناسا

اغلب در پارچه های دو بعدی قابل مشاهده است، کاهش خطر ترک خوردگی و کوتاه تر شدن زمان تولید می شود. این روش همچنین دارای تاثیر مستقیم و غیرمستقیم بر کاهش هزینه های تولیدی و اجرایی است.

 **لزوم استفاده از مواد اولیه جدید برای توسعه پدهای فشاری قوی**

یک سیستم حفاظت حرارتی یا همان (TPS) از سفینه فضایی در برابر گرمای شدید محافظت می کند.

مواد TPS معمولاً مقاوم در برابر حرارت و عایق هایی با دانسیته پایین هستند که تا حدی هم شکننده می باشند. در فضایی اوریون که برای حمل انسان طراحی شده، برخی از بخش های مهم و حیاتی سیستم باید بسیار مستحکم باشند چون بخشی از ساختار خود فضاپیما هستند. مهندسان پس از تست پرواز اکتشافی شماره ۱ (EFT-۱) اوریون در سال ۲۰۱۴ دریافتند که مواد موجودی که به عنوان عایق حرارتی فداشونده سازه ای مورد استفاده قرار می گرفتند، برای ماموریت های آینده

برای انجام تحقیقات از سوی آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی برای توسعه فناوری بافندگی سه بعدی در اوایل دهه ۱۹۹۰ در حال کار بر روی بافندگی تار پودی سه بعدی می باشد.

در نهایت تغییرات اعمال شده بر روی ماشین آلات بافندگی موجود منجر به خلق یک ماشین بافندگی سه بعدی کاملاً خودکار شد که قابلیت تولید کامپوزیت های متعامد، ایزوتروپیک و شبه ایزوتروپیک و همچنین پیش فرم های نزدیک به شکل نهایی و با شکل نهایی پیچیده را دارد.

از این ماشین برای تولید ساختارهای کامپوزیتی تار پودی سه بعدی استفاده می شود که در بخش های هوافضا، خودروسازی، ساخت و ساز، نظامی و صنایع امنیتی کاربرد دارند.

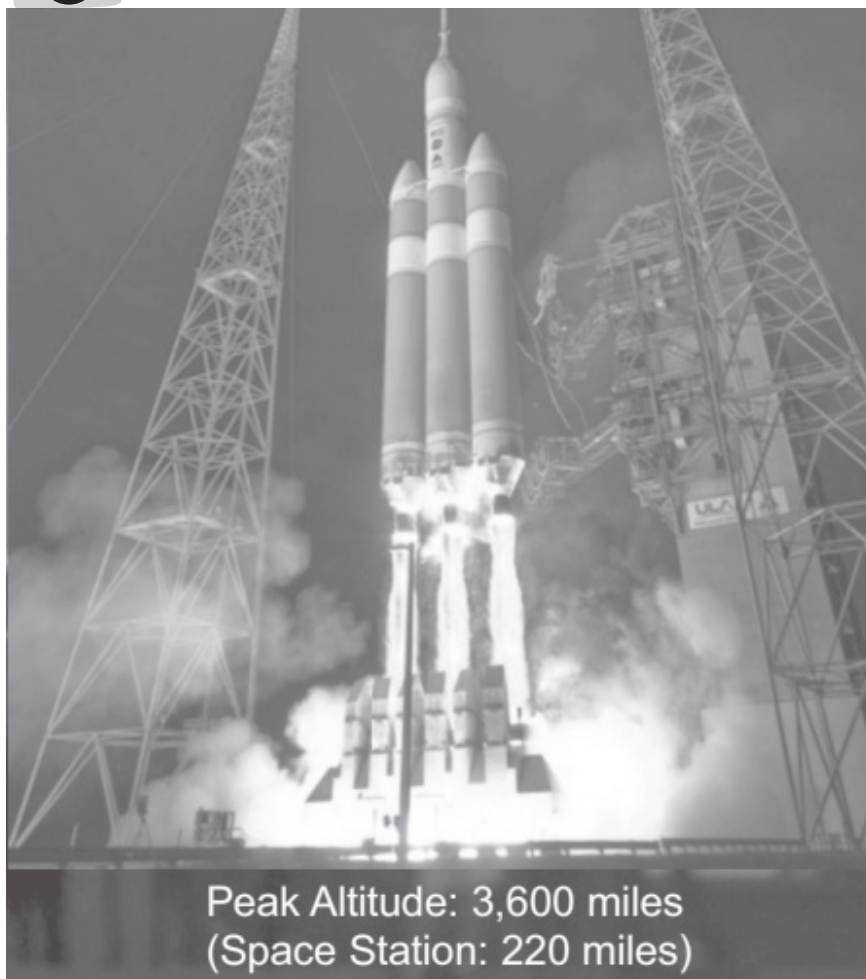
کرت ویلکینسون، مهندس نساجی ارشد کمپانی بالی ریبون می گوید: بافندگی تار پودی سه بعدی یک فناوری نوظهور است که در مقایسه با روش های تولید کامپوزیت های دو بعدی و همچنین تولید مواد راجع تر مانند فولاد و آلومینیوم مزایای متنوعی دارد.

بافندگی سه بعدی در مقایسه با پارچه های دو بعدی باعث کاهش وزن، از بین رفتن لایه لایه شدن که

اداره ماموریت فناوری های فضایی ناسا و شرکای تیم توسعه آن در طول دهه گذشته موفق به توسعه فناوری چندین سیستم حفاظت حرارتی (TPS) منحصر به فرد شده اند که با هدف حفاظت از سفینه فضایی در مقابل حرارت بسیار زیاد و شرایط سخت ورود به جو طراحی شده است. شرکت نساجی بالی ریبون میلز با همکاری نزدیک با مرکز پژوهشی ایمز ناسا و چندین شریک دیگر نسل جدیدی از مواد اولیه سخت و محکم منحصر به فرد را با استفاده از روش بافندگی تار پودی سه بعدی توسعه داده اند. انتظار می رود منسوج جدید علاوه بر استفاده در ماموریت های فعلی در ماموریت های آینده سفر به سیارات نیز مورد استفاده قرار بگیرد. در حال حاضر وزارت دفاع در حال بررسی استفاده از آن در سایر ماموریت های دفاعی می باشد. فرایندهای مربوط به توسعه فناوری های سیستم حفاظت حرارتی اکنون در موارد کاربردی متعددی مورد استفاده قرار می گیرند.

 **مزایای چشمگیر بافندگی تار پودی**

سه بعدی در مقایسه با سایر روش ها
کمپانی بالی ریبون از زمان دریافت یک قرارداد



فراتر از مدار پایین زمین مناسب نخواهند بود. ماده کربن فنولیک که در پدهای فشاری EFT-۱ مورد استفاده قرار گرفته بود، دارای استحکام بین لایه‌ای نسبتاً پایینی می‌باشد و برای تحمل بارهای سازه‌ای به یک قطعه فلزی تقویت کننده در برابر برش نیاز دارد.

برای انتخاب ماده مناسب که بتواند نیروها و تنش‌های وارده به فضاپیما را در ماموریت‌های بازگشت از ماه برآورده کند، انتخاب‌های کمی وجود داشت که علت آن محدودیت در سایز و عملکرد بود؛ به همین دلیل ناسا جستجو برای فناوری سیستم حفاظت حرارتی سفارشی را برای برآورده ساختن نیازهای مشخص و منحصر به فرد سفینه‌های فضایی سرنشین دار در زمان ماموریت آغاز کرد. قرار است در ماموریت اورپون/آرتمیس ناسا انسان‌هایی به اعماق فضا فرستاده شوند و هدف نهایی فرود فضاانوردان در سطح مریخ در دهه ۲۰۳۰ می‌باشد.

ناسا برای فضاپیمای سرنشین دار چند منظوره اورپون (MPCV) خود، استفاده از فناوری بافندگی سه بعدی را مورد بررسی قرار داد، در این فضاپیما پدهای فشاری به عنوان رابط بین ماژول خدمه و ماژول سرویس عمل می‌کنند.

محل‌های متعدد قرارگیری پدها در سپر حرارتی بخشی از ساز و کار کنار هم نگه داشتن ماژول خدمه و سرویس پیش از جدایی است چون پس از آن ماژول خدمه وارد مرحله بازگشت به زمین می‌شود.

پدهای فشاری باید بارهای سازه‌ای ایجاد شده در هنگام پرتاب دو ماژول، عملیات فضایی و جدا شدن ناشی از شوک پیروتکنیکی را تحمل کرده و سپس به عنوان یک سیستم حفاظت حرارتی فداشونده عمل کنند که قادر به مقاومت در برابر حرارت شدید در هنگام ورود مجدد به جو زمین است.

دکتر جی دی فلدمن، مهندس تحقیقات بر روی مواد اولیه در ناسا بیش از یک دهه است که عملیات توسعه و طراحی مواد محافظ در برابر حرارت یا همان سپر حرارتی را بر عهده دارد و موفق به کشف و توسعه رویکردهای جدیدی شده

است. بعدی (۳D-MAT) خوانده شد، دریافت کرد.

این پروژه در واقع ترکیب بافندگی سه بعدی نخ‌های کوارتز و قالب‌گیری انتقالی رزین به منظور توسعه یک ساختار چندمنظوره و مستحکم است که قادر به برآورده ساختن نیازهای مربوط به عملکرد حرارتی و ساختاری برای بازگشت به ماه و فراتر از آن باشد.

ماده جدید از طریق بافندگی سه بعدی نخ‌های کوارتز و سپس آغشته سازی آنها با رزین سیانات استر تولید می‌شود.

بافت متعامد سه بعدی بالی ریبون با حجم بالای الیاف باعث افزایش ۹۰۰ درصدی استحکام کششی در جهت محور Z می‌شود و آغشته سازی آن با رزین نیز ماده را کاملاً متراکم و فاقد منفذ می‌کند.

پروژه ۳D-MAT به سرپرستی مرکز پژوهشی ایمز ناسا با همکاری تعداد زیادی از شرکا از جمله کارخانه بالی ریبون و مرکز فضایی جانسون (JSC)

او متوجه قابلیت کمپانی بالی ریبون در اجرای بافندگی تار پودی سه بعدی پارچه‌های کامپوزیتی برای ایجاد ساختارهای یک تکه و پیچیده که سبک و در عین حال مستحکم هستند شد و شروع به همکاری با شرکت برای بهره‌گیری از تخصص و فناوری آنها کرد.

دکتر فلدمن با بازدید از کارخانه بالی ریبون به فکر استفاده از فناوری بافندگی سه بعدی این شرکت در سپر حرارتی ناسا افتاد. گفتگوی رو در رو به ناسا کمک کرد تا قابلیت‌های فناوری‌های بافندگی و بافت سه بعدی در تولید قطعات با اشکال پیچیده، مواد ترکیبی و الگوهای بافت متناسب با نیاز خود را بهتر درک کند.

بالی ریبون پس از تایید اولیه فناوری بودجه بیشتری برای کار بر روی آن چه که در نهایت سیستم حفاظت حرارتی فرسایشی چندمنظوره سه



ناسا که آغشته سازی با رزین در آن جا بوده، انجام شده است.

کامپوزیت سه بعدی در موسسه تحقیقات جنوبی، مرکز تحقیقات لنگلی ناسا و CSJ مورد آزمایش مکانیکی قرار گرفته است. تامین کننده اصلی بودجه این پروژه برنامه توسعه تحول آفرین (DCG) بوده؛ برنامه‌ای که به ایده‌ها و رویکردهایی می‌پردازد که قادر به حل مشکلات مهم مربوط به فناوری و ایجاد تحول در برنامه‌های فضایی آینده می‌باشند. پروژه‌های GCD از طریق آزمایش قطعات و زیرسیستم‌ها بر روی زمین به توسعه فناوری‌های می‌پردازند تا آنها را برای استفاده‌های آتی در فضا آماده سازی کنند.

تیم پروژه ۳D-MAT به خوبی با تیم‌های ناسا و لاکهید مارتین اوریون هماهنگ و یکی شده تا اطمینان حاصل شود که برنامه توسعه نیازهای مربوط به فضایی‌های چندمنظوره سرنشین دار را تامین می‌کند.

فرایندهای مشارکتی تکرارشونده و پیشرفت‌های غیرمنتظره بزرگ

ناسا برای شروع همکاری جزییات مورد نیاز در رابطه با مواردی نظیر حجم و درصد الیاف را در اختیار بالی ریون قرار داد.

پس از آن بالی ریون یک طرح و بافت پیش فرم پیشنهاد کرد که ابعاد آن چهار برابر بزرگ‌ترین پیش فرم بافته شده در این کارخانه بود. فرایند توسعه نیازمند ایجاد اصلاحاتی در تجهیزات موجود و خرید یک طرح جدید هارنس برای ماشین بافندگی ژاکارد بود تا بتوان ۵۰۰۰ نخ را به طور جداگانه کنترل کرد.

این پروژه نخستین دستاورد بافندگی متعامد سه بعدی خودکار و مداوم در مقیاس بزرگ (۱۲ اینچ در ۳ اینچ) و حجم بالای الیاف (۶۰ درصد) بود.

مقطع عرضی این پارچه چهار برابر بزرگ‌تر از نسخه قبلی آن است که آن را به یک پیشرفت غیرمنتظره تبدیل می‌کند. این پروژه همچنین منجر به یک نوآوری انقلابی در زمینه آغشته سازی با رزین شد و برای نخستین بار پیش فرم‌های بزرگ سه بعدی (کمتر از ۱ درصد تخلخل) کاملاً متراکم سازی شدند. این باعث می‌شود استحکام کامپوزیت ۳D-MAT به حداکثر برسد و امکان چگالش کامل در ضخامتی فراهم می‌شود که ۱۲ برابر بیشتر از رکورد فناوری‌های پیشین است.

ویلیکینسون می‌گوید: ناسا و بالی ریون یک جلسه بازیابی طراحی را برگزار کردند که در آن مهندسان مطرح از سراسر کشور گرد هم جمع شدند.

همکاری این افراد منجر به حل مسایل پیچیده فیزیک در همان جلسه شد، تجربه‌ای که بسیار الهام بخش و شگفت‌انگیز بود. بخشی از این گروه نخبه و پویا بودن به طرز باورنکردنی هیجان‌انگیز و یک تجربه فراموش‌نشدنی بود.

ترکیب معماری و مواد اولیه منجر به خلق یک کامپوزیت با عملکرد فوق‌العاده بالا شد. کامپوزیت ۳D-MAT در مقایسه با فنولیک کربن دو بعدی مورد استفاده در اوریون ۱-EFT دارای استحکام کششی نه برابر (در جهت Z)، مقاومت برشی سه برابر و ۲۵ درصد رسانایی حرارتی کمتر است.

کمپانی بالی ریون مواد اولیه خام را پردازش، ماشین‌آلات بافندگی را تنظیم و بافندگی ماده اولیه را آغاز کرد و آن را در اختیار ناسا قرار داد. کمپانی سن دیه‌گو کامپوزیتز برای انجام فرایند آغشته‌سازی با ناسا همکاری کرد.

پس از آن ناسا کامپوزیت‌های ۳D-MAT را مورد ارزیابی و آزمون قرار داد و لاکهید مارتین، ناسا و بالی ریون با همکاری یکدیگر اقدام به توسعه مشخصات فنی و دستورالعمل کنترل فرایند تولید آن کردند.

اجزای فشاری سپر حرارتی دارای عملکرد دوگانه‌ای هستند و مانند مواد اولیه چند منظوره‌ای عمل می‌کنند که برای اتصال دو ماژول به صورت سازه‌ای و در عین حال مدیریت حرارت باید سبک و همزمان مستحکم باشند.

بالی ریون موفق شد با انجام یک فرایند تکرار شونده و آزمون روش‌های مختلف برای ایجاد بافتی مناسب به صورت دو لایه به راه حل مناسب دست پیدا کند.

فناوری ۳D-MAT در واقع یک سیستم زیبا و پیچیده است که دو کارکرد مختلف در قالب یک بافت واحد در آن یکپارچه شده‌اند و معماری و ماده اولیه مورد نیاز را تامین می‌کنند.

ماده اولیه ثبت شده برآورده کننده نیازهای موجود بود و بلافاصله در ماموریت مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد بی نقصی را در آرتیس-۱ ارایه داد.

این ماده در حال حاضر در دسته فناوری‌های پروازی عملیاتی قرار می‌گیرد. لاکهید مارتین نیز





روش بافندگی سه بعدی به کار رفته برای تولید HEEET روش موثری بوده و در مقایسه با مواد پیشین به جرم کمتری نیاز دارد. کارآمدی این ماده در بیشتر ماموریت‌ها بسته به نوع کاربرد با جرمی تا ۵۰ درصد مواد متداول، دو برابر است.

علاوه بر آن HEEET در حال گرفتن جایگاه سیستم رزین فنولیک کربن کاملاً متراکم است که به طور متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ نوعی ماده پلاستیکی که پیش تر در ماموریت‌های گالیله ناسا به زهره و مشتری مورد استفاده قرار گرفته بود. سیستم قبلی ناکارآمد بوده و مواد اولیه به کاررفته در آن دیگر به آسانی در دسترس نیست و حتی در دسته مواد اولیه سمی قرار گرفته است.

محققان ناسا در HEEET موفق به یافتن راهکاری برای مواد اولیه با ویژگی‌های مدرن تر، در دسترس تر، با سمیت کمتر و بر پایه فرایندهای تولید مدرن که در برابر حرارت مقاوم باشد، شده اند

آینده‌ای هیجان انگیز برای مواد اولیه سه‌بعدی بافته شده

سرمایه گذاری ناسا بر روی سیستم حفاظت حرارتی با بافت سه بعدی منجر به توسعه موفق موادی شده است که برای استفاده در بسیاری از ماموریت‌های فضایی جاری یا از پیش برنامه ریزی شده در نظر گرفته شده اند.

علاوه بر آن بسیاری از محصولات جدید با استفاده از فرایندهایی که به عنوان بخشی از مسیر توسعه 3D-MAT خلق شد، تولید شده‌اند از جمله وسایل نقلیه هایپرسونیک و دفاعی، اجزای سازه‌ای خودروهای مسابقه‌ای فرمول یک، سامانه‌های حفاظت در برابر انفجار و تجهیزات کاهش تهدید، مخازن تحت فشار تقویت شده با پوشش کامپوزیتی، صفحات پایه خمپاره انداز و بدنه موتور راکت.

مرجع:

“3D Woven Thermal Protection System Technologies Support NASA Space Missions”, International Fiber Journal, June 2026

که مستقیماً در معرض شرایط سخت محیط ورود به جو زمین قرار می‌گیرد. درونی‌ترین لایه یک لایه عایق است که وظیفه آن مدیریت بار حرارتی می‌باشد. این لایه که تراکم آن کمتر است، دارای رسانایی حرارتی پایینی بوده و از نخ‌های ترکیبی فنولیک/کربن تشکیل شده است. این دو لایه به صورت یکپارچه به یکدیگر بافته شده اند و از نظر مکانیکی در هم قفل می‌شوند اما اتصال پیوندی بین آنها برقرار نیست.

این ماده با رزین فنولیک دارای دانسیته متوسط آغشته سازی می‌شود و در مقایسه با ماده استاندارد فرساینده کربنی آغشته به رزین فنولیک (ACIP) دارای مقدار رزین فنولیک بیشتر و منافذ باز کمتری است.

مهم ترین چالش توسعه HEEET برای استفاده در سپرهای حرارتی نیاز به ایجاد درز بین تکه‌های بافته شده به دلیل وجود محدودیت در عرض قابل بافت بود.

تیم تحقیقاتی برای حل این مشکل از یک پرکننده بین تکه های بافته شده استفاده کرد تا با افزایش انعطاف پذیری اتصال تنش‌های سازه‌ای را در همه حالات بارگذاری کاهش دهد و اتصالی مقاوم در

برابر شرایط آیرودینامیکی و حرارتی ایجاد کند. دوعامل ذاتی مربوط به ماده HEEET و کاربردهای آن در ماموریت‌ها تعیین کننده الزامات طراحی درزهای این سیستم هستند. شرایط آیرودینامیکی ماموریت‌هایی که در آنها از HEEET استفاده می‌شود؛ ایجاب می‌کند تا عرض نواحی بدون پشتیبان اتصال چسبی به کمترین مقدار خود برسد تا از گسترش خرابی در محل درز جلوگیری شود.

علاوه بر آن با منحرف شدن ساختار حامل، معماری این ماده باید برای حفظ سازگاری خود با این ساختار بدون ایجاد تنش‌های بیش از حد، انعطاف پذیری خود را حفظ کند.

ویژگی های ماده HEEET این امکان را برای سفینه فضایی فراهم می‌کند تا بالاترین شرایط حرارتی که در ماموریت‌های ناسا تجربه می‌شود را تحمل نماید.

از 3D-MAT در بخش‌های مختلفی از ماژول خدمه اوریون استفاده می‌کند.

ویلیکینسون شرح می‌دهد که همکاری با ناسا و بهره گیری از قابلیت‌های بافندگی سه بعدی کمپانی بالی ریبون برای کمک به مدرنیزه کردن سیستم حفاظت حرارتی فضایی اوریون یک تجربه سرگرم کننده و مشارکتی بوده که برای تمام افرادی که در آن دخیل بودند جنبه‌های مثبت به همراه داشت.

بالی ریبون همچنین از همکاری با ناسا برای آموزش بیشتر فناوری بافندگی به آنها برای ساخت سیستم‌های بهتر بسیار لذت برد.

توسعه سپر حرارتی سه بعدی پایدارتر

کمپانی بالی ریبون همچنین در زمینه طراحی ماده اولیه ای که برآورده کننده نیازهای ناسا در رابطه با فناوری سیستم حفاظت حرارتی برای ماموریت‌های علوم سیاره‌ای که با شرایط بسیار شدید گرمایی هنگام ورود به جو مواجه هستند، همکاری کرده است. این ماده اولیه باید هنگام ورود سفینه با سرعت بالا به جو زمین از آن در برابر حرارت بسیار زیاد محافظت کند.

ناسا با هدف توسعه سیستمی که ضمن مدیریت حرارت، چالش‌های مربوط به پایداری برخی از سیستم‌های قدیمی حفاظت حرارتی مانند کربن فنولیک را نیز کاهش دهد، شروع به همکاری با کمپانی بالی ریبون و شرکای دیگر برای توسعه نوع جدیدی از کامپوزیت کربن فنولیک دو لایه با بافت سه بعدی و دانسیته متوسط کرد.

این ماده که در نهایت فناوری « سپر حرارتی برای شرایط ورود با حرارت زیاد» (HEEET) نام گرفت، برای استفاده در سفینه‌هایی با قطر پایه کمتر از یک متر تا بیشتر از ۳/۵ متر طراحی شده است.

ماده جدید دارای یک بافت سه بعدی دو لایه است که به صورت لایه به لایه به یکدیگر متصل شده اند. بیرونی ترین لایه وظیفه مدیریت فرسایش سطحی را بر عهده دارد.

این لایه یک بافت متراکم تر از الیاف کربن است