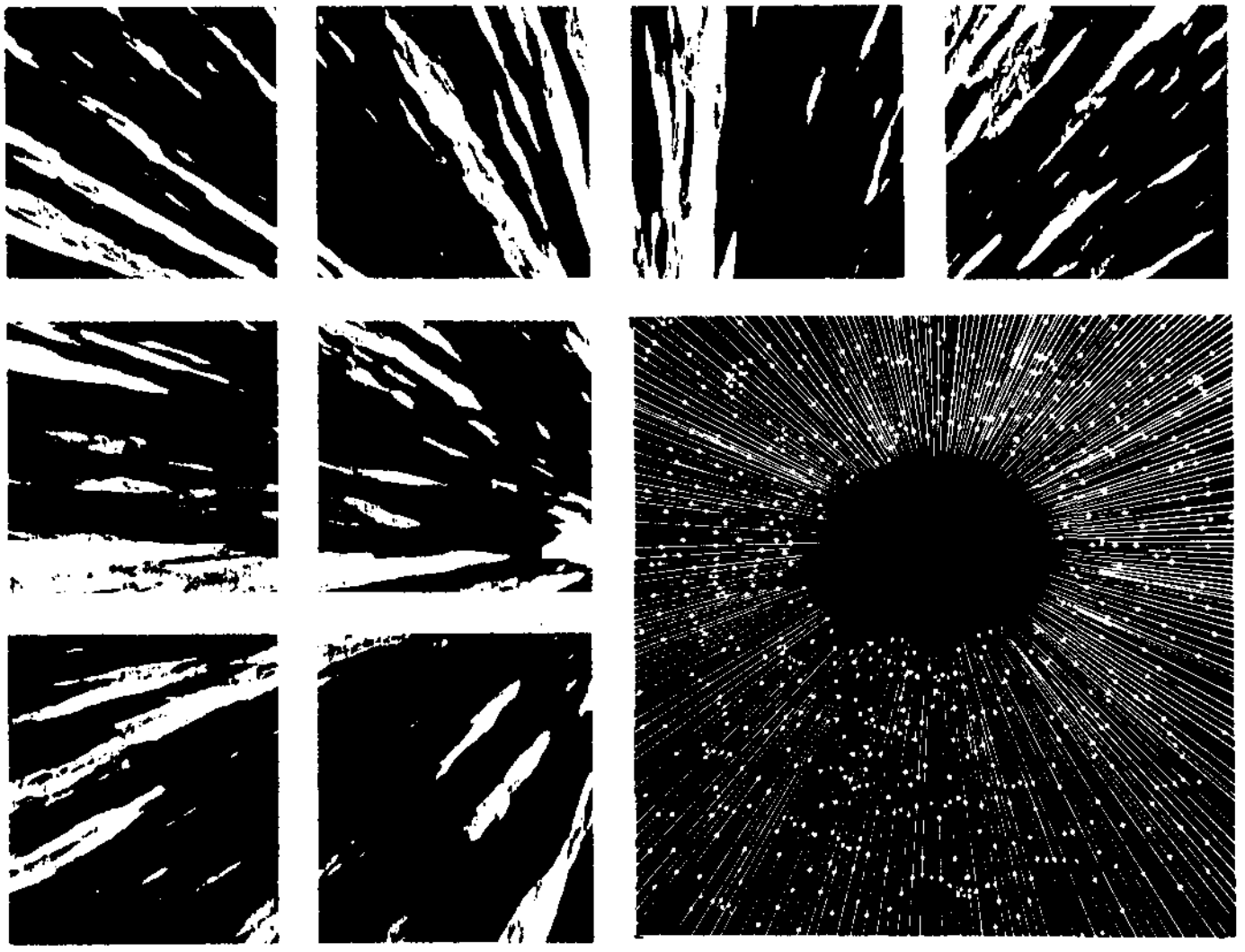


(۱)
الیاف کربن

Carbon Fibers

تألیف: دکتر فتح‌الله فرهادی

چکیده

بین الیاف بشر ساخته، که در تولید آنها سعی فراوانی در تقلید از نمونه‌های طبیعی انجام گرفته است، الیاف کربن شایسته توجه خاصی هستند. این الیاف از چند جنبه اهمیت دارند که عبارت‌اند از:

خصوصیات منحصر به فرد مکانیکی، قیمت رو به کاهش و بهبود تدریجی خواص. فرایندهای تولید الیاف کربن طی مدتی کوتاه، رشد و تکاملی قابل تحسین یافته‌اند و آینده بسیار درخشانی برای کاربرد گسترده آن پیش‌بینی می‌شود. مواد اولیه مناسبتر به منظور دستیابی به خواص برتر، جایگزین اولین مواد به کار رفته شده‌اند. برای هر یک از کاربردهای متنوع، از تولید هواپیمای پرخرج بمب‌افکن تا راکت تنیس ارزان قیمت، الیاف کربن با خصوصیاتی منتخب تولید می‌گردند. با توجه به اطلاعات عام منتشره در مقالات علمی، تولید این الیاف در مقیاس نیمه صنعتی در مراکز تحقیقاتی کشور به سهولت امکان‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی

الیاف کربن، الیاف گرافیت، کامپوزیت‌ها، هوا ـ فضا، تقویت کننده‌ها

Key Words:

Carbon Fibers, Graphite Fibers, Composites, Aerospace, Reinforcements.

مقدمه

نگاهی گذرا به دور و بر ما نشان از وجود انواع پلیمرهایی می‌دهد که هر یک چشمه‌ای از صنع الهی می‌باشند. اساس این پلیمرها، که حاوی پروتئینها، کربوهیدراتها و یا انواعی از خاکهای معدنی به عنوان پرکننده هستند، به مصداق «آب مایه حیات است»، سازگاری با آب می‌باشد. برحسب مورد، برخی خواص این پلیمرها به اعلی درجه از تکامل رسیده‌اند:

ـ سفتی، در عاج فیل، شاخ گوزن، شاخ گاو، چوب، پوست گردو.

ـ مقاومت کششی، تار عنکبوت (به طور نسبی و گرچه «سست‌ترین خانه‌ها از آن ساخته می‌شود») تار ابریشم، کتان، کنف.

ـ چقرمگی (مقاومت تا پارگی) پوست کوسه، پوست سوسمار، ساقه خوشه نارگیل.

ـ کشسانی، رباط (دم کانگورو)، بادکنک ماهی، شاخه نخل.

ـ دوام (احتمالاً برای چند هزار سال) چوب سیک درخت بالسا (با نام علمی Ochroma Lagopus) پوست و موی ماموت، استخوانهای دایناسورها.

سیستمهای پلیمری خطی (الیاف رشته‌ها، چندلاتیها) وزن مولکولی حوالی چند میلیون دارند و انعطاف‌پذیر مثل پروتئینها یا زنجیری صُلب مانند مواد سلولزی هستند. سیستمهای صفحه‌ای مثل پوستها، غشاها و برگها به صورت ورق ـ ورق، لایه‌های پیونددار یا به صورت برگهایی بر روی هم تا شده (مثل پروتئینها) هستند.

مثال بارزی از کامپوزیتهای طبیعی، چوب است که چندهزار تیره آن تا به حال شناخته شده است و اساساً از دو جزء اصلی تشکیل یافته است: سلولز و لیگنین، سلولز الیافی است با وزن مولکولی حدود چند میلیون، فیبری شکل نیمه بلوری با زنجیرهای نسبتاً صُلب و لیگنین شبکه‌ای از چند ترکیب حلقوی و سه بعدی است.

بشر سعی فراوان نموده است که به نحوی از پلیمرهای طبیعی و نیز کامپوزیتهای طبیعی تقلید کند ولی همواره یک مشکل عمده بر سر راه او بوده است.

همه مواد سنتزی بشر ساخته، در محدوده وزن مولکولی بسیار کوچکتری نسبت به آنچه در طبیعت وجود دارد، به کار گرفته می‌شوند و دلیل آن هم مشکلات فرآیندی است. زیرا ما هنوز نمی‌دانیم که در مقیاس وسیع ماکرومولکولهای با وزن مولکولی بیش از چند میلیون را چگونه به صورت مقرون به‌صرفه‌ای ذوب کنیم، بریسیم‌قالب‌گیری کنیم و یا از اکسترودر عبور دهیم. الیاف کربن نیز از این قماش‌اند.

از نظر مقایسهٔ خواص این پلیمرها، نگاهی کوتاه به مدول کشسی متوسط و مقاومت کششی متوسط برخی از الیاف، وضعیت مواد مختلف را روشنتر می‌سازد. جدول ۱ این مقایسه را نشان می‌دهد. در این جدول مدول کشسی محوری (مدول یانگ Young's Modulus) برحسب پوند بر اینچ مربع $\times 10^6$ بیان شده و عبارت است از نسبت تنش کششی محوری به کرنش محوری. مقاومت کششی نیز برحسب پوند بر اینچ مربع $\times 10^5$ بیان شده است و عبارت است از مقاومت کششی الیاف در امتداد محوری. درصد افزایش طول تا پارگی نیز در ستون آخر آمده است [1].

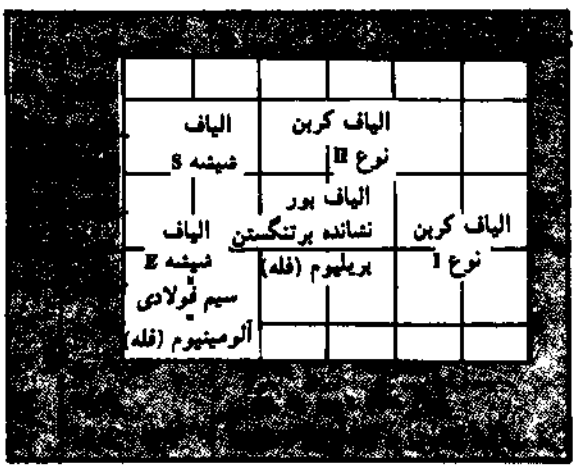
جدول ۱ پارامترهای شاخص درمورد برخی از الیاف

الیاف	مدول کشسی 10^6psi	مقاومت کششی 10^5psi	درصد افزایش طول تا پارگی
ابریشم عادی	۰/۱۶	۰/۰۹	۲۵
ابریشم کشیده	۰/۹۲	۱/۳	۳
ابریشم لیلین فلد(۱)	۰/۷۰	۰/۱۳	۷
پلی استر	۰/۲۰	۰/۰۹	۲۵
کولار(۲)	۲/۲	۰/۴۸	۵
شیشه	۱۰	۲/۸	۱۲
گرافیت	۳۲	۳/۰	۰/۸
فولاد	۳۰	۸	۱۰

(1) Lilienfeld

(2) Kevlar from Dupont

شکل ۱ نیز مقایسه‌ای بین مقاومت کششی مخصوص (نسبت مقاومت کششی به وزن مخصوص) و مدول مخصوص (نسبت مدول یانگ به وزن مخصوص) انواع مواد مصرفی در کامپوزیتها را نشان می‌دهد [5].



شکل ۱ ـ مقایسه نسبی انواع مواد از نظر مقاومت کششی مخصوص برحسب مدول مخصوص [5]

(* الیاف کربن محصول شرکت مادمور Modmor انگلستان)

تاریخچه الیاف کربن

اینکه ژاپنیها، اروپائیها یا آمریکائیها کدام یک زودتر الیاف کربن

را ساخته‌اند مورد اتفاق نظر نیست. ژاپنیها ادعا می‌کنند اولین بار الیاف کربن را از پلی اکریلونیتریل یا پان (PAN) در سال ۱۹۵۹ در آن کشور ساخته شد و گزارش آن نیز در سال ۱۹۶۱ انتشار یافت [2]. البته الیاف شیشه به عنوان جزء سازنده مهم فایبرگلاس ابتدا در انگلستان و سپس در آمریکا و ژاپن به ترتیب درسالهای ۱۹۳۲، ۱۹۳۷ و ۱۹۳۸ در مقیاس تجاری جهت استفاده در صنایع هواپیمایی به کار گرفته شدند ولی انگلیسیها مدعی به کارگیری الیاف کربن در ۱۹۶۳ در مقیاس آزمایشگاهی هستند [3]. آمریکائیها برای لوث کردن موضوع، ادعا کرده‌اند اولین سازنده الیاف کربن درواقع توماس ادیسون بوده که الیاف پنبه را به الیاف کربن تبدیل ساخت تا از آن به عنوان فیلامان لامپ در ۱۸۷۹ استفاده کند [1] و نیروی دریایی آمریکا پس از آن به دلیل آنکه فیلامان تنگستن ارتعاشات کشتی را بهتر تحمل می‌کرد، الیاف کربن را کنار گذاشت، تا در فاصله بین سالهای ۱۹۵۵ تا ۱۹۶۰ «دوباره» آن را اختراع کند. جدول شماره ۲ سیر تاریخی مسأله «اختراع مجدد» الیاف کربن را به روایت آمریکائیها [1] نشان می‌دهد.

کاربردهای الیاف کربن

مهمترین کاربرد الیاف کربن جانشینی الیاف شیشه در مصارف گوناگون است. به همین دلیل مروری بر به کارگیری و بهره‌برداری از الیاف شیشه در ساخت انواع فایبرگلاس مفید خواهد بود. ساخت الیاف شیشه به هزاره‌های قبل از میلاد مسیح توسط اقوامی در بین‌النهرین باز می‌گردد ولی تار شیشه حدوداً در سال ۱۹۳۲ به صورت پیوسته در مقیاس تجاری عرضه گردید. شیشه وقتی به صورت الیاف درآید قابل انعطاف و بسیار محکم است.الیاف شیشه‌ای که برای ساخت پلاستیکهای‌تقویت شده به کار می‌روند و به نام پشم شیشه معروف‌اند، دارای مدول یانگ برابر ۶۹ GPa می‌باشدوقتی الیاف را بتابند به صورت نخ درمی‌آید که از آن می‌توان پارچه نیز بافت. اگر لایه‌ای از پارچه شیشه‌ای را به یک پلیمر با مقاومت کششی کم، نظیر اپوکسی، آغشته سازند و همان‌گونه که خیاطی پارچه پشمی را به صورت لباس مطابق شکل بدن «درمی‌آورد»، کامپوزیت حاصل را در قالب مناسبی قرار دهند و پلیمرکنند، قطعه‌ای با خواص منتخب به دست می‌آید. نسبت وزنی الیاف به اپوکسی غالباً یک به یک

جدول شماره ۲ سیر تاریخی الیاف کربن [1]

سال	ماده اولیه	نوع و محل عرضه	
۱۸۷۹	پنبه	فیلامان لامپ، آمریکا	اولین عرضه تجاری فیلامان کربن
۱۸۷۰	سی وی دی [1]	فیلامان کربن به روش سی وی دی، فرانسه	قدیمی‌ترین تحقیق شناخته شده الیاف کربن به روش سی وی دی
۱۹۴۴	سی وی دی	فیلامان کربن جهت دار به روش سی وی دی، آمریکا	نخستین مشاهده ساختار جهت‌دار فیلامان کربن
۱۹۴۴	پی ای ان[2]	تحقیقات الیاف کربن، «اورلون سیاه»، آمریکا	احتمالاً اولین الیاف کربن تولیدی از پی ای ان
۱۹۵۸	پی وی دی[3]	الیاف با ساختار بلوری گرافیتی[4]، آمریکا	به ثبوت رساندن مقاومت و مدول بسیار بالا
۱۹۵۹	ریون[5]	پارچه گرافیتی، آمریکا	اولین تولید محصول، کاربردهای منفرد در هوا ــ فضا
۱۹۶۱	پی ای ان	تحقیقات الیاف کربن، ژاپن	اولین تحقیق عمده روی الیاف کربن از پی ای ان
۱۹۶۴	قطران	تحقیقات الیاف کربن، ژاپن	اولین تحقیق عمده روی الیاف کربن از قطران
۱۹۶۴	پی ای ان	الیاف کربن از پی ای ان با مدول بالا، انگلستان	کاربردهای منفرد و عالی در ژاپن و انگلستان
۱۹۶۴	ریون	الیاف کربن از ریون با مدول زیاد، آمریکا	کاربردهای منفرد و عالی در آمریکا
۱۹۶۵	ریون	«تورنل ۲۵[6]»، آمریکا	اولین نخ پیوسته از الیاف کربن با مدول بالا در مقیاس تجاری
۱۹۶۶	پی ای ان	الیاف کربن با مقاومت بالا، انگلستان	کاربردهای با رشد فزاینده الیاف کربن
۱۹۶۷	پی ای ان	«مادمور I[7]»، انگلستان	اولین الیاف کربن با مدول بالا ساخته شده از پی‌ای‌ان در مقیاس تجاری
۱۹۷۰	قطران	پی ای ان بهبود یافته، ژاپن	سلطه پراکنده صنعت کربن ژاپن
۱۹۷۰	قطران	الیاف با مدول بالا از مزوفاز قطران، آمریکا	اولین الیاف کربن حاصل از قطران مزوفاز
۱۹۷۵	قطران	«تورنل پی ــ ۵۵»، آمریکا	اولین الیاف کربن حاصل از قطران با مدول بالا در مقیاس تجاری
۱۹۸۰	پی ای ان	«تورنل پی ــ ۱۰۰»، آمریکا	عرضه نخ کربن با مدول بسیار بالا برای کاربردهای فضایی
۱۹۸۳		الیاف کربن با مقاومت بسیار بالا، ژاپن	کاربردهای منفرد و اساسی در صنایع هوا ــ فضایی

(1) Chemical Vapor Deposition
(2) Polyacrylonitrile
(3) Physical Vapor Deposition
(4) Whisker
(5) Rayon
(6) Thornel 25
(7) Modmor I from Modmore Ltd

است. کامپوزیت حاصل مدول کشسی برابر ۶/۹ GPa (10^6 psi) و مقاومت کشسی برابر ۳۷۹ GPa (55×10^6 psi) دارد. این مقاومت در مقایسه با آلیاژهای متداول آلومینیم در صنایع هوایپمایی بسیار جالب توجه است؛ این مقایسه وقتی نمود پیدا می‌کند که وزن مخصوص آلیاژ آلومینیم و کامپوزیت را مدنظر قرار دهیم، یعنی ۲/۸ در مقابل ۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب (وزن مخصوص شیشه ۲/۶ و وزن مخصوص رزین اپوکسی ۱/۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است) [4]. بنابراین نسبت مقاومت به وزن در مورد کامپوزیتها تقریباً ۲۰ درصد بیش از آلیاژهای آلومینیم خواهد بود، در عین آنکه از نظر ساخت، کامپوزیتها برای شکل‌پذیری احجام ایرودینامیک، قابلیت ممتازی دارند. ولی یک نقطه ضعف در مورد فایبرگلاس وجود دارد که مقادیر کم مدول کشسانی آن در مقایسه با آلیاژهای آلومینیم است (در حدود یک به ده). این امر پژوهشگران و مهندسین را بر آن داشت تا درصدد یافتن الیافی با مدول بهتر از الیاف شیشه باشند. در پی این تحقیقات الیاف بور با مشکلات بسیار تولید و با قیمت گران ساخته شد. مشکل تولید الیاف بور این است که فقط به روش نشاندن بخارات (*Vapor Deposition*) تولید می‌شود، بدین ترتیب که تاری از تنگستن را از اتاقکی پرشده از بخار بور عبور می‌دهند تا نافلز بور بر آن بنشیند. تار بور حاصل برای کاربردهای موردنظر شکننده است ولی مقاومت متوسط کشسی و نیز مدول کشسانی آن بسیار بالاست و در نتیجه کامپوزیت بسیار مرغوبی بدست می‌آید. یک‌مشکل‌دیگر نیز باقی می‌ماند و آن قیمت بالای الیاف بور است که در سال ۱۹۶۵ که برای اول بار به صورت تجاری عرضه شد، هم قیمت طلا یعنی کیلویی حدوداً ۱۲۰۰ دلار بود. امروزه نیز، فرایند تولید انبوه هنوز هم کند و گران است؛ قیمت طلا دراین فاصله زمانی ۱۶ برابر افزایش یافته، یعنی در ۱۹۸۰ یک اونس الیاف بور (حدود ۲۸ گرم) همان قدر می‌ارزید که در ۱۹۶۵ یک پوند آن (حدود ۴۵۴ گرم) ارزش داشت.به این ترتیب زمینه تحقیق برای‌تولید الیاف کربن فراهم آمد.

با چنین اوصافی نیاز اصلی به الیاف کربن تولید کامپوزیتهای پیشرفته (*Advanced Composites*) بود (در آمریکا این عبارت را برای پلاستیکهای تقویت شده با الیاف به کار می‌برند که در آن الیاف از کربن، کولار، بور یا ترکیبی از اینها ولی غیر از الیاف شیشه باشد). چنین نیازی عمدتاً از روی صنایع نظامی به خصوص صنایع هوایپمایی و سپس هوا ـ فضایی مطرح گردید، در نتیجه مهمترین مؤسسات سرمایه‌گذار در امر تحقیقات الیاف کربن، به خصوص در آمریکا، انگلستان، فرانسه و ژاپن انحصاراً مؤسسات فضایی ـ هوانوردی وابسته به دولتها بوده‌اند. همان‌گونه که ذکر شد سبکی کامپوزیتهای حاصل نیز یک مزیت است زیرا هر کیلو صرفه‌جوئی در وزن هواپیما به معنی حمل بار اضافه برای هواپیماهای غیرنظامی و به معنی حمل سلاح و سوخت بیشتر برای هواپیماهای نظامی است. در مورد هواپیماهای نظامی از موارد زیر به عنوان نمونه‌هایی از کاربرد کامپوزیت‌ها می‌توان نام برد:

۱ ـ در ۱۹۷۲ شرکت گرومن (*Grumman*) جهت تیغه قائم تثبیت کننده دم هواپیماهای شکاری *F-14* و شکاری بمب‌افکن *F-111* از کامپوزیت بور ـ اپوکسی استفاده کرد.

۲ ـ شرکت مک‌دانل داگلاس (*Mc Donnel Douglas*) جهت بخش ساکن بالهای هواپیمای بمب‌افکن *A-4* مستقر بر ناوهای هواپیمابر کامپوزیت گرافیت ـ اپوکسی را به کار برد.

۳ ـ شرکت نورث روب (*Northrop*) استفاده از کامپوزیتها جهت سکان، تیغه قائم و تیغه افقی دم در جنگنده *F-15* را شروع و در ۱۹۷۱ آن را وارد خط تولید کرد (۱۹/۵ کیلو گرافیت ـ اپوکسی و ۸۵ کیلو بور ـ اپوکسی ولی جمعاً تنها ۲ درصد از وزن کل هواپیما).

۵ ـ شرکت هاوکر سیدلی (*Hawker Siddeley*) با کمک مک دانل داگلاس، برخی از قطعات، از جمله تیغه‌های بال هواپیمای عمود پرواز *Av 8B* - را از کامپوزیتها ساخت.

۶ ـ شرکت مختلط اروپایی آئروسپاسیال (*Aerospatial*) تیغه‌های ملخ هلیکوپترهای پوما (*Puma*)، دافین (*Dauphine*) و غزال (*Gazelle*) را از الیاف شیشه و الیاف کربن می‌سازد.

۷ ـ تقریباً تمام قسمتهای هواپیماهای گلایدر فعلی و به همین ترتیب قایقهای نظامی،صیادی و تفریحی از انواع کامپوزیتها تولید می‌شوند.

۸ ـ به طوری که گزارش شده است یک هواپیمای کوچک که همه قسمتهای اصلی آن از کامپوزیت ساخته شده نیز در ۱۹۸۱ در آمریکا به پرواز در آمد [3]. این هواپیمای یک موتوره جت شخصی که لی‌یرفن (*Lear Fan*) نام داشت، قدرت حمل ۱۶۰۰ کیلوگرم بار بی‌مصرف سوخت سرانه‌ای برابر با یک اتومبیل شخصی را دارد.

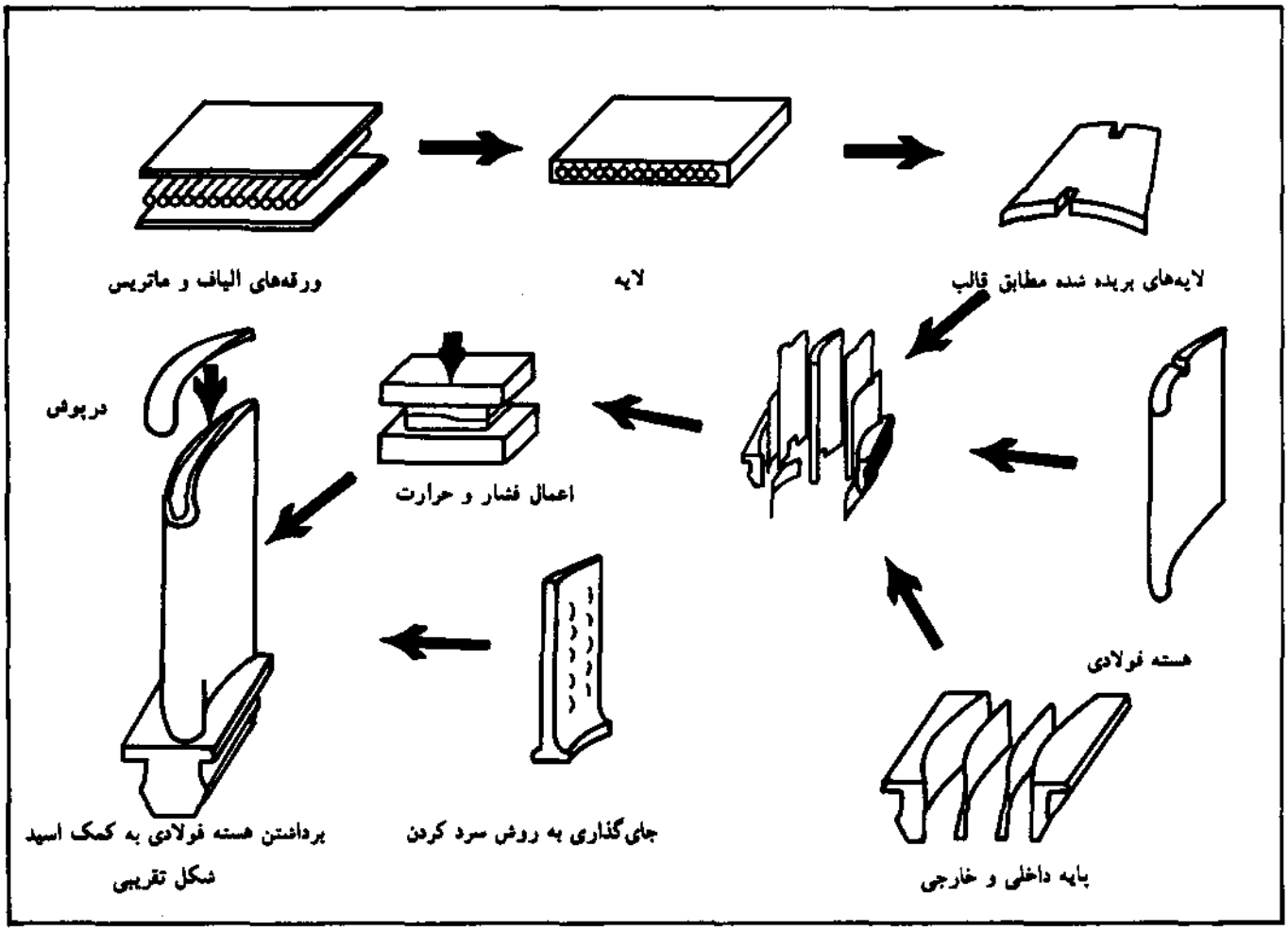
۹ ـ در تولید هواپیماهای پهن پیکر (*Wide Body*) ابتدا آمریکائیها از اروپائیها عقب ماندند. در هواپیماهای ایرباس، قطعات بسیاری از کامپوزیتها ساخته شده‌اند. رقبای آمریکایی ایرباس نیز مانند بوئینگ، لاکهید و داگلاس، جهت قطعات متحرک هواپیماهای غیرنظامی خود از گرافیت ـ اپوکسی و یا کولار ـ اپوکسی استفاده نمودند. به عنوان مثال در هواپیمای بوئینگ مدل ۷۵۷ از ۱۵۱۵ کیلوگرم کامپوزیت استفاده شده است که در نتیجه ۶۷۰ کیلوگرم کاهش وزن حاصل شده است (یعنی حدود ۸ مسافر اضافی). ولی باید در نظر داشت که هنوز تنها ۳ درصد از کل وزن سازه‌ای هواپیما را کامپوزیتها تشکیل می‌دهند که در مقایسه با مدل ۷۴۷ که ۰/۵ درصد بوده، رقم چشمگیری است. امید می‌رود در دهه ۱۹۹۰ حدود ۶۵ درصد از وزن سازه‌ای هواپیما را کامپوزیتها تشکیل دهند.

۱۰ ـ در تولید قطعاتی که فشار یا دمای بالا را تحمل می‌کنند از کامپوزیتهای کربن استفاده فراوان می‌شود. این کاربرد هم شامل زمینه‌های نظامی و هم غیرنظامی می‌شود. یک زمینه نظامی کاربرد آن ساخت جداره شیپوری موتور راکتها از کامپوزیت الیاف کربن است. یک کاربرد عمده دیگر آن ساخت سپر حرارتی محافظ ماهواره‌ها و سفاینی است که حین

ورود به جو، به دلیل اصطکاک بسیار زیاد در سرعتهای ورود به جو، شاهد دماهای بسیار بالا هستند. کامپوزیت الیاف کربن و رزین فنولی این دماهای بالا را برای مدت کوتاه تحمل می‌کند. این کاربرد به *Ablation* معروف است. یک کاربرد غیر نظامی در دمای بالا نیز تولید تیغه توربینهای گازی است (شکل ۲) [3].

در تولید الیاف کربن و گرافیت می‌باشند که روشهای تولید آن هنوز کاملاً مخفی نگهداشته می‌شود.

طبیعی است که زندگی روزمره نیز از این پدیده نظامی بی‌نصیب نمانَد و از کامپوزیتهای مصرفی در صنایع نظامی، در صنایع دیگر نیز استفاده شود. علاوه بر قایقهای تفریحی، بادبانی، صیادی، وسایل دیگر



شکل تقریبی

شکل ۲ ــ مراحل مختلف تولید پره توربین گازی از کامپوزیت الیاف کربن

یک نکته بسیار مهم دیگر وجود دارد که در صنعت هواپیمایی خصوصاً هواپیمایی نظامی حائز اهمیت حیاتی است: کامپوزیتهای کربن ــ اپوکسی یا گرافیت ــ اپوکسی نسبت به موج رادار باز تابنده نیستند، پس هواپیمایی که از کامپوزیت فوق ساخته شود از دید رادار مخفی می‌ماند. حداقل ۵ سال پس از پروازهای موفقیت‌آمیز این نوع هواپیماهای جنگی آمریکا *(B-2)*، وقتی یکی از آنها سال گذشته میلادی در کالیفرنیا سقوط کرد، ذکری علّی از آن به عمل آمد. وقتی همگان از وجود آن اطلاع یافتند یک نمونه از آن نیز در سال ۱۹۸۹ در معرض تماشای خبرنگاران گذاشته شد. ظاهراً در ۲۶ تیر ۶۸ نیز پس از خرج ۲۳ میلیارد دلار نخستین پرواز علنی خود را در حضور خبرنگاران انجام داد. این مسأله نقطه عطفی

ورزشی نظیر اسکی، نیزه مخصوص پرش، راکت تنیس و نظیر آنها نیز از این کامپوزیتها ساخته شدند. سعی و رقابت فراوانی نیز وجود دارد که در وسایط نقلیه هم از این الیاف استفاده شود. حتی میل گاردان و فنرهای شمش جهت کامیونها را نیز با استفاده از همین الیاف تولید کرده‌اند. کمپانی فورد در سال ۱۹۸۲ یک اتومبیل سواری ساخت که بدنه آن تماماً از الیاف کربن ساخته شده بود.

مشکلی که در ارتباط با الیاف کربن قابل توجه است مسأله قیمت تمام شده است. قیمت نوار پیش‌ساخته کربن ــ اپوکسی در ۱۹۸۰ کیلویی ۱۱۰ دلار، قیمت یک کیلو پارچه پشم شیشه ۷/۸ دلار و در مورد ورق آلیاژ آلومینیم برابر ۵ دلار بوده است. در ۱۹۸۲، ژاپنیها الیاف کربن را با قیمتی

بمراتب ارزانتر عرضه کردند و از آنجا که شرکت ژاپنی توری (*Toray*) بیش از ۴۰ درصد از تولید جهانی را در دست دارد، قادر خواهد بود با استفاده از قطران به عنوان ماده اولیه چنین کاهش قیمتی را بوجود آورد.

شکل ۳ ــ هواپیمای بمب‌افکن ب ــ ۲ نامرئی در مقابل رادار

مزایا

۱ ــ دودهای خروجی از موتورها از بالای بال خارج می‌شوند در نتیجه از زیر، طیف مادون قرمز مرئی کمتری دارند.

۲ ــ افزودن کلروفلوئورو سولفونیک اسید موجب نامرئی شدن دنباله دود هواپیما می‌شود.

۳ ــ شیشه اتاق خلبان با پوشش مخصوص پوشیده شده تا در مقابل رادار کمتر بماند.

۴ ــ توربوفن موتور پنهان شده است.

۵ ــ بدنه از مواد جاذب رادار ساخته شده است.

معایب

۱ ــ قیمت بیش از ۵۰۰ میلیون دلار برای هر فروند

۲ ــ سرعت کم

۳ ــ بُرد کم به دلیل نبودن امکان تعبیه باک خارجی

۴ ــ موتور داخل بال‌سازه را ضعیف و حادثه را مصیبت‌بار می‌کند.

۵ ــ نداشتن دم باعث ناپایداری پرواز است.

۶ ــ وجود اسید در سوخت موجب خورندگی است.

۷ ــ دودها در ناحیه ماوراء بنفش مرئی هستند.

۸ ــ از دید رادارهای پانین‌نگر آواکسها مخفی نمی‌ماند.

۹ ــ نمی‌تواند رادار شناسایی به همراه داشته باشد زیرا علائم رادار آن را کشف خواهند نمود.

تولید الیاف کربن

تعریف

الیاف کربن عبارت است از مجموعه‌ای از تارهای کربن (الیافی به قطر ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۵ میلی‌متر و حاوی بیش از ۹۲ درصد وزنی کربن) انعطاف‌پذیر، هادی جریان الکتریکی، بی‌اثر از نظر شیمیایی بجز در برابر اکسایش، و در برخی از انواع ممتاز آن دارای مدول یانگ بالا و مقاومت زیاد. تمایز بین الیاف کربن و الیاف گرافیت بخوبی روشن نیست. عبارت الیاف گرافیت قاعدتاً باید به موادی اطلاق گردد که نظم بلوری سه‌بعدی گرافیت را دارند. بر اساس یکی از تعاریف ارائه شده [5] الیاف کربن حاوی ۹۰ تا ۹۸ درصد کربن می‌باشد و ساختار بلوری آنها به روشنی معلوم نیست. از سوی دیگر الیاف گرافیت نظم بلوری، وزن مخصوص بیشتر و نیز خلوصی بیش از ۹۹/۹ درصد وزنی دارد. بهمین دلیل هدایت الکتریکی و نیز هدایت حرارتی الیاف کربن کمتر از الیاف گرافیت است و در مواردی که نیاز به عایق حرارتی یا الکتریکی باشد نظیر استفاده در ساخت دماغه ماهواره‌ها و موشکها که موقع بازگشت به زمین در تماس با هوای جو دماهای بسیار بالا را باید تحمل کنند، از آنها استفاده می‌شود.

خواص مطلوب

جدول ۳ مقایسه‌ای بین خواص انواع الیاف کربن و رشته‌های فلزی و الیاف دیگر را نشان می‌دهد [1]:

الف ــ وزن الیاف. عامل مهمی برای هر ماده مصرفی در صنایع هوا ــ فضایی است. الیاف کربن تنها از نظر سبکی بعد از کولار قرار دارند و وزن مخصوص آنها بین ۱/۳ تا ۲/۲ گرم در هر سانتی‌متر مکعب است.

ب ــ شقّی (*stiffness*). غالباً با مقاومت کششی بالا توام است، خصلت بارز تمامی انواع الیاف کربن به جز نوع مدول پائین آن می‌باشد. حتی نوع مدول پایین الیاف کربن نامرغوب دارای مدول یانگ بزرگتری از فولاد (۲۳۰ در مقایسه با ۲۱۰ *GPa*) هستند. اگر مبنای سنجش مدول مخصوص باشد، یعنی نسبت مدول بر وزن مخصوص، مدول مخصوص الیاف کربن ۵ برابر فولاد است. الیاف کربن نوع مدول بسیار بالا، دارای مدولی است (۹۰۰ *GPa*) که به حد تئوریک مدول یک بلور واحد گرافیت نزدیک است (۱۰۲۰ *GPa*).

ج ــ مقاومت کششی. انواع تجاری الیاف کربن دارای مقاومت کششی به میزان ۵۰۷ *GPa* است که هیچ نوع الیاف دیگری به این میزان مقاومت ندارد.

د ــ پایداری ابعاد. در کاربردهای فضایی چنین خصوصیتی مهم است. الیاف کربن با خصوصیات عالی در دماهایی کمتر از ۳۷۵°C دارای ضریب انبساط حرارتی کوچک و منفی است.
مهندس طراح کامپوزیت باید با بهره جستن از این خصوصیت و انتخاب یک ماده مناسب به عنوان ماتریس قطعاتی طراحی کند که ضریب انبساطی تقریباً نزدیک به صفر دارا باشند.

ه ــ هدایت الکتریکی و حرارتی . تغییرات این دو کمیت محدوده وسیعی را در بر می‌گیرد. در مورد غالب الیاف کربن گرافیتی با مدول بسیار بالا، هدایت الکتریکی مخصوص حدوداً سه برابر هدایت الکتریکی مخصوص فولاد است. ضریب هدایت حرارتی الیاف کربن در دمای متعارف یا کمتر از آن از ضریب حرارتی مس نیز بیشتر است.

روشهای تولید الیاف کربن

از غالب پلیمرها به عنوان ماده اولیه جهت تولید الیاف کربن

جدول شماره ۳ ــ خواص منتخبی از الیاف کربن و مقایسه آن با سایر مواد

نوع الیاف	وزن مخصوص g/cc	مدول یانگ (G Pa)	مقاومت کششی (G Pa)	مقاومت الکتریکی (μΩ -m)	هدایت حرارتی (W/m°K)
الیاف کربن مدول پایین حاصل از ریون یا از قطران الیاف کربن مرغوب	۱/۷ ــ ۱/۳	۶۰ ــ ۴۰	۱/۰ ــ ۰/۶	۱۰۰ ــ ۳۰	۲۸ ــ ۷
با مقاومت زیاد حاصل از PAN	۱/۸ ــ ۱/۷	۲۵۰ ــ ۲۳۰	۴/۰ ــ ۲/۸	۳۰ ــ ۱۲	۱۰ ــ ۷
با مقاومت بسیار زیاد حاصل از PAN	۱/۸ ــ ۱/۷	۲۹۰ ــ ۲۶۰	۵/۷ ــ ۴/۱	۲۰ ــ ۱۴	۹ ــ ۷
با مدول بالا حاصل از PAN یا قطران مزوفاز	۲/۰ ــ ۱/۸	۵۵۰ ــ ۳۵۰	۳/۵ ــ ۱/۷	۱۰ ــ ۵	۲۰۰ ــ ۶۰
با مدول بسیار بالا حاصل از قطران مزوفاز یا روش سی وی دی	۲/۲ ــ ۲/۰	۹۰۰ ــ ۶۰۰	۲/۴ ــ ۲/۱	۴ ــ ۱	۲۵۰۰ ــ ۴۰۰
الیاف کولار	۱/۴۵	۱۳۰	۳/۶	$>10^{15}$	۰/۰۸ ــ ۰/۰۴
الیاف شیشه	۲/۵	۹۰ ــ ۷۰	۴/۰ ــ ۲/۰	$>10^{15}$	۱/۰ ــ ۰/۵
الیاف فولاد	۷/۸	۲۱۰	۲/۵ ــ ۰/۶	۰/۱	۶۵ ــ ۳۵
الیاف مس	۸/۹	۱۲۰	۲۲۰	۰/۰۲	۴۰۰

می‌توان استفاده کرد زیرا اعمال حرارت بر یک پلیمر منجر به ایجاد تغییر شکل مولکولی پلیمر شده و نهایتاً ماده‌ای تولید می‌شود که درصد کربن بالایی دارد. برخی از مواد متداول در تولید الیاف کربن عبارت‌اند از: سلولز، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌آمیدها از جمله نایلون ۶ و نایلون ۶۶، پی‌وی‌سی، پلی‌استرها، قطران از منابع مختلف و پلی‌اکریلونیتریل (PAN). در واقع الیاف کربن نام ژنریکی برای الیاف حاصل از منابع مختلف‌اند. الیاف گرافیتی حاصل، برخلاف ساختار مستحکم الماس، دارای ساختاری لایه‌ای است. بدین معنی که حین فرایندهای تولید در الیاف کربن لایه‌هایی از پلیمر تغییر شکل یافته، به صورت حلقه‌های کربنی در می‌آیند. برحسب اینکه این لایه‌ها دارای چه ابعادی باشند، آرایش و جهت‌یابی بلورین نیز متأثر خواهد شد و به همین دلیل نیز طیفی از خصوصیات برای انواع الیاف کربن حاصل می‌شود.

بطورکلی فرایندهای تولید الیاف کربن سه مرحله اصلی را در بردارند:

مرحله اول: پایدار کردن الیاف که طی آن الیاف اولیه به نحوی تغییر می‌یابد تا حین اعمال حرارت ذوب نشود.

مرحله دوم: عملیات حرارتی که منجر به حذف عناصری غیر از کربن موجود در ماکرومولکول اولیه می‌گردد.

مرحله سوم: گرافیتی کردن الیاف حاصل از مرحله دوم به منظور بهبود خواص فیزیکی.