فراورش گرمانرمهای تقویت‌شده با الیاف

Processing of Fibre Reinforced Thermoplastics
By: M. Mahlke
Engineering Plastics Vol 2, No 3, 1989

ترجمه: هوری میوه‌چی

واژه‌های کلیدی:

فراورش، پیش آغشته، رشته پیچی، ماتریس، گرمادهی

در این مقاله به بحث درباره فراورش پیش آغشته با عمل رشته پیچی و تکنولوژی آن می‌پردازیم. همچنین چگونگی فراورش مواد پیش آغشته با توجه به خصوصیات ماتریسهای گرماسخت و گرمانرم مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرد.

طراحی ماشین آلات برای پیچیدن پیش آغشته و تجهیزات لازم برای دستیابی به سرعت بالا از بخشهای دیگر مقاله است. در ضمن تجربیات با پیش آغشته‌های گرمانرم و گرماسخت با یکدیگر مقایسه می‌شوند و روشهای گرمادهی در سیستم با توجه به انواع سیستمهای گرمادهی بحث می‌شوند.

گرانروی ماتریسهای همراه با الیاف گوناگون و به طور مشخص گرانروی رزینها مورد بررسی قرار می‌گیرد و ویژگیهای گرمانرمهای تقویت شده با نسد و شیشه (GMT) ارائه می‌گردد. (۴)

فراورش مواد لیفی پیش آغشته برای مواد کامپوزیت لیفی

فراورش پیش آغشته الیاف مداوم در عمل رشته پیچی

پیش آغشته (ماده لیفی پیش آغشته شده) نامی است که به محصول اولیه در ساخت قطعات کامپوزیتی لیفی داده می‌شود. بر اساس شرایط روش تولید اتخاذ شده، این مواد از لحاظ ترکیب با یکدیگر فرق دارند.

برای فراورش رشته پیچی، الیاف پیوسته پیش آغشته با مواد ماتریس مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها در فرایند اولیه تولید می‌گردند. چنین الیاف تقویت کننده‌ای در اصل شامل شیشه، دوده و مواد سنتزی هستند. گرما سختها و گرمانرمها هر دو به عنوان مواد ماتریس فراورش می‌شوند. برخی ماتریسهای گرما سخت عبارت انداز: پلی‌استر غیراشباع، اپوکسیدها، ایمیدها و فنولها. پلی‌اتر سولفون، پلی سولفون، پلی آمید، پلی

Key Words:

Processing, Prepreg, Filament winding, Matrix, Heating

اتراترکتون و پلی‌پروپیلن در میان سایر مواد به عنوان ماتریسهای گرمانرم مناسب تشخیص داده شده و مورد آزمون قرار گرفته‌اند. دماهای فراورش بین $230^{\circ}C$ (برای پلی‌پروپیلن) و $360^{\circ}C$ (برای پلی‌اتر سولفون) است. فراورش گرمانرمهای تقویت شده با الیاف بلند امکانات جدیدی را عرضه می‌کند، چون هیچ واکنش شیمیایی همانند آنچه در فراورش گرماسخت روی می‌دهد وجود ندارد و مواد می‌توانند در آخر شکل بگیرند و به هم جوش بخورند.

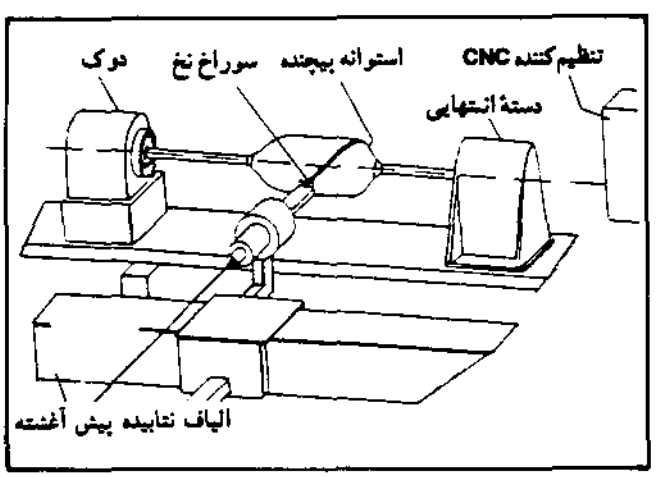
یکی از دلایل مصرف پیش آغشته‌های لیفی پیوسته در رشته پیچی در برابر آغشته کردن تر سنّتی حین فرایند پیچیدن ممکن است تقاضاهای زیاد با توجه به کیفیت قطعه در ارتباط با هزینه‌های تولید باشد.

در این مقاله کاربردهای مفید برای رشته پیچی با مواد پیش آغشته توصیف می‌شوند و برخی جنبه‌های فراورش ماتریسهای گرمانرم مورد بحث قرار می‌گیرند.

تکنولوژی رشته پیچی

فرایند رشته پیچی جهت تولید کالاهای با تقارن چرخشی، بدون درز یا با سطوح درونی نرم مانند ظروف، لوله‌ها و دوکها از اهمیت زیادی برخوردار است. پیشرفتهای جدید مانند پیچیدن با آدم آهنی (روبوت) و شبیه سازی فرایند (شبیه سازی رشته پیچی *CAD/CAM*) نیز تولید قطعات متقارن غیرچرخشی را ممکن می‌سازد *[1,2,3,4]*. فن پیچیدن دقیق الیاف پیوسته، تولید قطعاتی با استحکام بالا را ممکن می‌سازد و اعمال بارها هم می‌تواند بهینه شود، که مشابه آن با سایر فرایندهای تولید امکان پذیر نیست *[5]*.

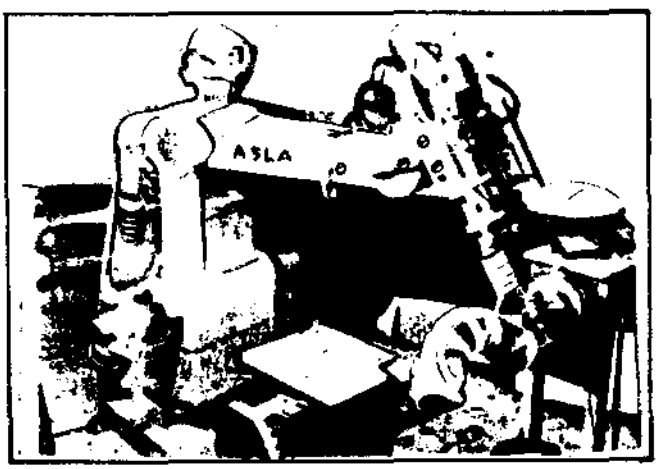
خود فرایند رشته پیچی با دسته رشته‌های نتابیده یا نوارهای بافته شده از پیش آغشته با ماده ماتریس که توسط سیستم هیدرولیک عقب کش روی مغزه چرخان پیچیده می‌شود، مشخّص می‌گردد (شکل ۱). مغزه‌های چندبار مصرف یا یکبار مصرف می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در مورد دوّم از فلزات با نقطهٔ ذوب پایین، گچ یا ترکیبات نمکی یا مواد تورم



شکل ۱ ــ رشته پیچی با مغزه

پذیر استفاده می‌شود. یا اینکه مواد می‌توانند داخل قطعه باقی بمانند. ما مغزه‌های ساخته شده از اسفنج پلی اورتان ($\rho = 0/3 g/cm^3$) را که به آسانی ساخته و تخریب می‌شوند یا اغلب ممکن است در داخل قطعه به جا بمانند ترجیح می‌دهیم. در صورتی که در رشته پیچی، قطعات استوانه‌ای روی ماشینهای رشته پیچی تولید می‌شوند، دو مسئله در قطعات متقارن غیر چرخشی رخ می‌دهد که می‌تواند با استفاده از آدم آهنیهای صنعتی به جای ماشینهای رشته پیچی سنّتی حل گردد. انتقال داده‌ها توسط برنامه‌ریزی «درون آموزشی» (*Teach-in*) جهت تعیین تعداد خطوط چیده شده بر روی مغزه‌های متقارن غیرچرخشی کاملاً مناسب است. علاوه بر آن آدمهای آهنی رشته پیچ به دلیل تعداد بیشتر محورها آزادی حرکت بیشتری از دستگاه‌های رشته پیچ سنّتی ارائه می‌دهند.

آدمهای آهنی رشته پیچی که به موازات رشته پیچی در آزمایشگاه همان به کار می‌بریم برای توسعه و تهیه جهت تولید کاملاً مناسب‌اند. (شکل ۲).



شکل ۲ ــ رشته پیچی با آدم آهنی و ابزار نوار گردان

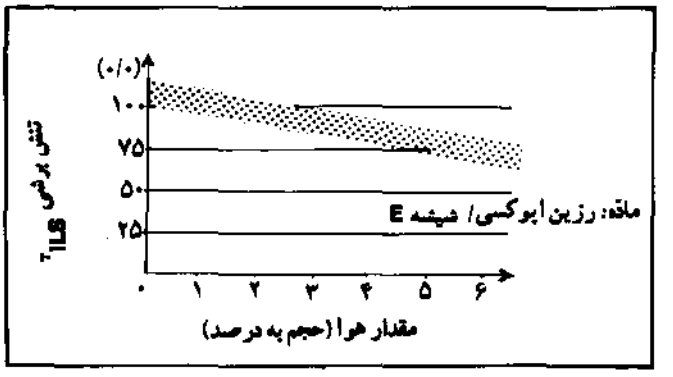
دلایل فراورش مواد پیش آغشته

بر اساس خواص فراورش مختلف ماترسیهای گرمانرم و گرماسخت هنگام پیچیدن، مواد امروزه به چند گروه تقسیم می‌شوند.

ماتریسهای گرماسخت

میزان پیش آغشته شدن الیاف تأثیر مستقیم بر خواص مکانیکی لایه‌های قطعه دارد. در حین فرایند پیچیدن، پیش آغشته شدن هم تحت تأثیر پارامترهای فراورش قرار می‌گیرد که ناشی از عوامل دیگرانند (اختلاف در استحکام لیف، تفاوت در سرعت پرش). با جدا کردن فرایند پیش آغشته‌سازی از فرایند پیچیدن، پیش آغشته‌های یکنواخت و تکرارپذیر را می‌توان تولید کرد. در مواردی که سرعت پرش لیف بالا یا متغیر است، پیش آغشتگی ناکافی خواهد بود زیرا نفوذ کامل و یکنواخت ماتریس به داخل تارهای لیف و بیرون راندن هوای بین رشته‌های منفرد انجام نمی‌گردد. در عین حال سرعتهای بالای پرش منجر به ورود حبابهای

هوا می‌شود که از راه پف کردن در حمام رزین، همچنین باعث کاهش کیفیت لایه می‌گردد. تضعیف خواص مکانیکی به خصوص باعث کاهش استحکام برشی بین لایه‌ای (*ILS*) می‌شود، بدین ترتیب که برای هر یک درصد هوا، کاهشی حدود ۳/۴ درصد *ILS* را می‌توان انتظار داشت (شکل ۳) [6].



شکل ۳ ــ استحکام برشی بین لایه‌ای چند لایه‌ایهای صفر درجهٔ UD (٠°UD)

مزایای دیگر فراورش مواد پیش آغشته در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ ــ مزایای فراورش مواد پیش آغشته با ماتریس گرماسخت

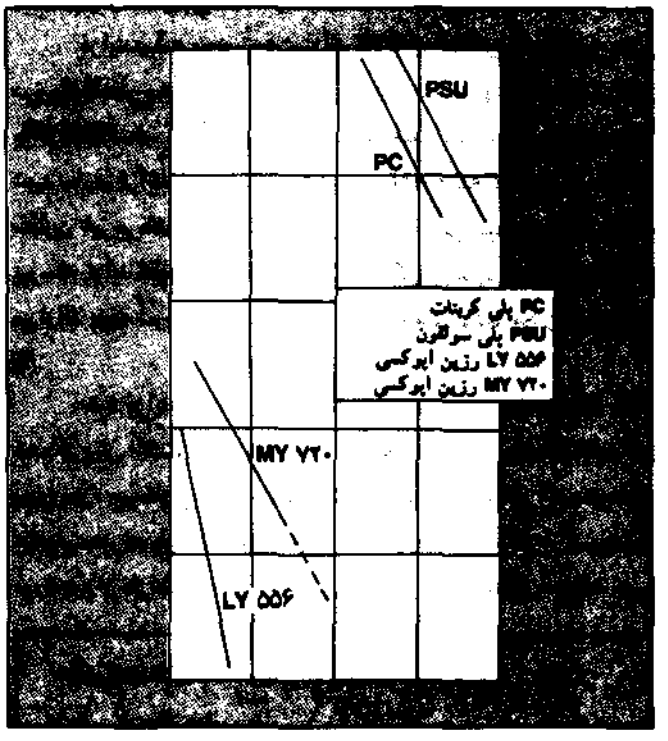
انعطاف‌پذیری، تغییر سریع بار	تمیز کردن دستگاه پیش آغشته‌ساز لازم نیست
پاکیزگی	گرانروی قابل تنظیم فراورش مانع از جدا شدن رزین از مغزه می‌گردد
زمان توقف طولانی	فواصل نگهداری برای تمیز کردن دستگاه پیش آغشته‌ساز عملی نیست.
راهنمای محافظتی الیاف	ماتریس به عنوان فیلم روان‌کننده عمل می‌کند و از صدمه دیدن الیاف یا رشته‌ها در پرش لیف جلوگیری به عمل می‌آورد
لیف غیر هندسی	گرانروی بالاتر، اصطکاک در برابر مغزه و عامل ایمنی را در برابر لغزش افزایش می‌دهد

مسائلی که در پیچیدن‌تر قطعات با اشکال هندسی پیچیده پیش می‌آید را می‌توان با استفاده از مواد پیش آغشته حل کرد. یک نمونه پیچیدن با نوارهاست که با استفاده از یک نوار گردان نیاز به یک حمام پیش آغشته‌ساز نیز دارد که با نوار بچرخد، که به دلیل مسائل درزگیری مشکل می‌توان این عمل را انجام داد. از سوی دیگر حرکت یک آدم آهنی رشته پیچ فقط در صورتی می‌تواند به طور کامل مورد بهره‌برداری قرار گیرد که حرکت همزمان یک حمام پیش‌آغشته‌ساز حاوی رزین مایع ضروری نباشد.

ماتریسهای گرمانرم

اگرچه فراورش گرماسختهای تقویت شده با الیاف مرتبط با واکنش شیمیایی در ماتریس است، ولی در مورد گرمانرمها فقط فرایندهای فیزیکی هنگام ساخت به وقوع می‌پیوندد که عبارت انداز: گرم شدن، ذوب، جاافتادن و سرد شدن. چون فرایندهای شیمیایی فقط در تهیه مواد اولیه رخ می‌دهند و نه در مراحل مخلوط شدن و پیش آغشته‌سازی و پخت، باید بتوان کیفیت یکنواخت‌تری را در آغشته‌ها و قطعات به دست آورد. مزیت دیگر این است که چون پخت در ماتریسهای گرمانرم رخ نمی‌دهد، هیچ انقباض واکنش هم صورت نمی‌گیرد.

پیش‌آغشته‌سازی الیاف با ماتریسهای گرمانرم بسیار پیچیده‌تر از پیش‌آغشته‌سازی با گرماسختهاست که ناشی از گرانروی بسیار بالاتر مذاب یا گرانروی محلول گرمانرم است. این موضوع در شکل ۴ [7] برای



شکل ۴ ــ مقایسه گرانروی سیستمهای ماتریس مختلف

پلی‌کربنات و پلی‌سولفون در مقایسه با دو رزین ایوکسی نشان داده شده است.

یک روش ممکن برای اجرای پیش‌آغشته‌سازی پیوسته الیاف با ماتریسهای گرمانرم شامل ذوب کردن رزینهاست. پیش‌آغشته‌سازی به دلیل گرانروی بالای مذاب فقط در سرعت پایین ممکن می‌شود. دلایل مخالف پیش‌آغشته‌سازی طی فرایند پیچیدن به ترتیب عبارت انداز: سرعتهای غیریکنواخت پیش‌آغشته‌سازی، کار با دستگاه داغ

پیش‌آغشته‌ساز، چون دماهای نرم شدن ماتریسهای گرمانرم از $120^{\circ}C$ به بالاست. میلهٔ راهنمای الیاف شامل کشش‌دهندهٔ لیف با ماتریس چسبناک ولی مایع است.

روش دیگر پیش‌آغشته‌سازی، با ماتریسهای گرمانرم، یعنی پیش‌آغشتن با حلال، برای رشته پیچی چندان مناسب نیست. چون کیفیت چند لایه‌ای به علت باقی مانده‌های حلال تضعیف می‌شود یا پیچیدگی تکنولوژی ساخت مورد نیاز بسیار زیاد می‌گردد [8].

طراحی ماشین‌آلات برای پیچیدن پیش‌آغشته‌ها [9]

(الف) فراورش گرماسختها

شرایط عام در مورد طراحی ماشین‌آلاتی که ما به‌کار می‌بریم توسط سرعتهای بالای (تا ۳ متر بر ثانیه) پرش الیاف (شروع حرکت الیاف) و مادّه تحت فراورش (سخت شدن ماده با ماورای بنفش، سیستم پیش‌آغشته‌ساز اورتان) تعیین می‌شوند. افزودن ماشین‌آلات لازم به ماشین‌آلات برای ماشینهای رشته‌پیچ متداول نیز ممکن است. در مواردی که سرعتهای پرش بالا باشند، طرح صلب و فشرده تکمیل ماشین‌آلات، اساس تولید تکرارپذیر است. ترتیب مسیر الیاف مستلزم توجه ویژه است، چون مواد لیفی حساس نیاز به محافظت دارند، به طور مشخّص از پیچهای تند باید حذر کرد و مواد با اصطکاک کم را برای میله‌های راهنمای الیاف باید مورد استفاده قرار داد.

سرعتهای بالای تولید احتیاج به تبدیل سرراست ماسوره‌های الیاف نتابیده به مغزه‌های رشته پیچی دارند. شرایط برای تکمیل ماشین در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

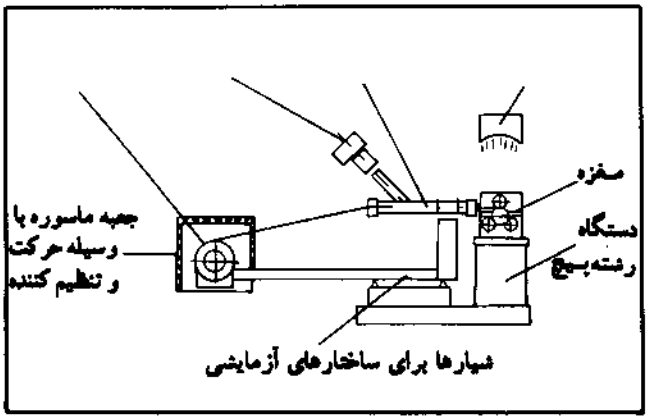
جدول ۲ ــ نیازها برای تجهیزات پیش‌آغشته‌پیچی

سرعت پیچش	تا ۳ متر بر ثانیه
استحکام الیاف F_0	۰ تا ۱۵۰ نیوتن
تغییر در استحکام الیاف F_0	۱۰ درصد
زاویهٔ پیچش	درجه ۹۰ ــ ۷۵
ماسوره پیش‌آغشتن	به طور عمده تغییر مسیر خارجی

دستگاه و اجزای ماشین زیر برای تأمین شرایط چرخشهای بالاتر مغزه و فرایند رشته پیچی لازم‌اند (شکل ۵):

- چرخ دنده با دنده‌های سیّار (۵: ۱ = u) برای چرخ مغزه
- میله راهنمای رشته و واحد گرمایش رشته
- نصب ماسوره و چرخ برای پیش‌آغشته‌های رشته‌ای
- واحد برای تنظیم کشش رشته
- تابش ده ماورای بنفش برای پخت چند لایه‌ایهای رزین پلی‌اورتان

حتّی تنظیم کشش رشته‌ها نقش قاطعی در کیفیت چندلایه‌ای قطعه



شکل ۵ ــ تجهیزات برای رشته پیچی با سرعت بالا

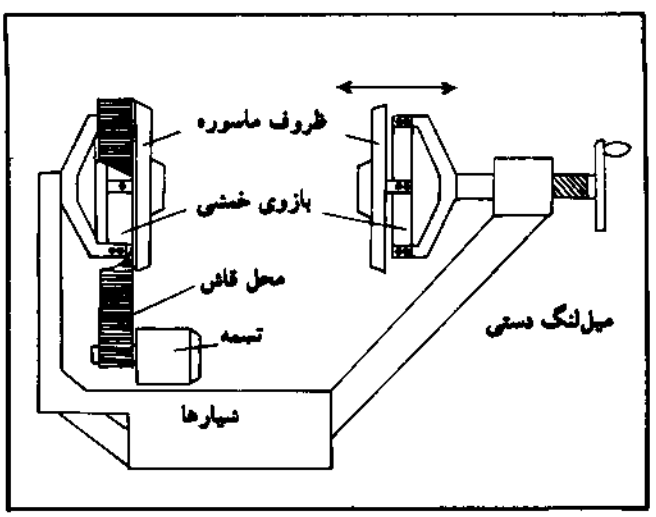
از راه پرش پیش‌آغشته ایفا می‌کند [9,10,11]. شرایط فنی مناسب آن راهنمایی مستقیم و یکنواخت پیش‌آغشته‌ها و شرایط زیر برای چرخ ماسوره است.

چرخ ماسوره باید مشخصات زیر را دارا باشد:

ــ حفظ کشش مطلوب رشته‌ها بدون عناصر اضافی راهنمای رشته (یعنی بدون غلتکهای کمکی) برای جلوگیری از صدمه دیدن احتمالی پیش‌آغشته‌های رشته‌ای.

ــ داشتن گشتاور سختی پایین به‌طوری که تنظیم پاسخ‌دهندهٔ سریع امکان‌پذیر شود.

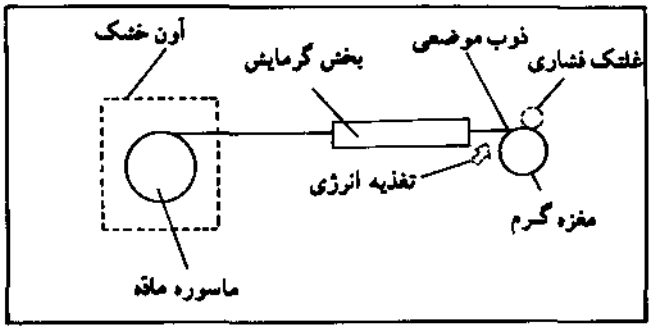
چرخ ماسوره پیشنهاد شده (شکل ۶) انجام پرش رشته را تقریباً بدون نیرو یا با کشش پرش رشته تا ۱۵۰ نیوتن ممکن می‌کند. ماسوره با یک تکیه‌گاه مخصوصی نگهداشته می‌شود که اندازه‌گیری کشش رشته را توسط یک اهرم خم‌شونده بدون تماس مستقیم با الیاف نتابیده (شکل ۶) امکان‌پذیر می‌سازد. چرخش ماسوره بوسیله یک تسمه دنده‌ای توسط یک موتور مسطح چهارپله‌ای انجام می‌شود.



شکل ۶ ــ چرخ ماربیچ

(ب) فراورش گرمانرمها

ترتیب ماشین برای فراورش پیش‌آغشته‌های گرمانرم شامل یک ماشین رشته پیچ معمولی / آدم‌آهنی رشته پیچ با وسایل گرمایش اضافی برای میله‌های راهنمای پیش‌آغشته‌ها و مغزه رشته پیچ (شکل ۷) است. دماهای کار لازم به‌طور مثال برای پلی‌اتر سولفون: $^{\circ}C$ ۱۵۰ در مراحل گرمایش دهی، $^{\circ}C$ ۳۳۰ روی مغزه رشته پیچ و $^{\circ}C$ ۱۶۰ در پرش می‌باشند *[12]*.



شکل ۷ ــ پیچیدن با پیش‌آغشته‌های گرمانرم

مغزه رشته پیچ توسط جریان باریک هوای داغ تا دماهای مغزه $^{\circ}C$ ۳۵۰، با تغییرات دمای بسیار اندک حدود ۲ درصد گرم می‌شود که در شکل ۸ نشان داده شده است. هوای داغ که داخل مغزه را گرم می‌کند می‌تواند از نقطه تغذیه خارج شود.

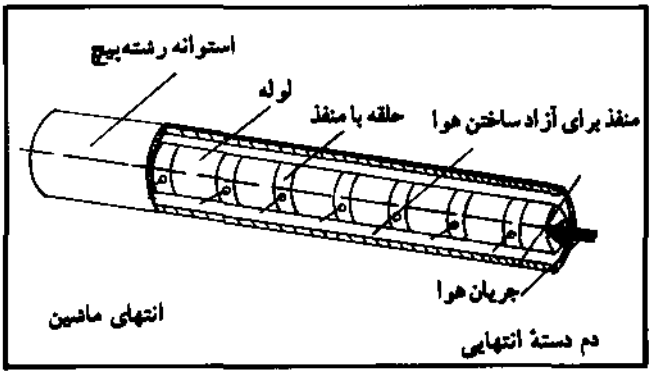
انتهای استوانه رشته پیچ روی لبه دستهٔ انتهایی به داخل پایهٔ سه غلتک فولادی وارد می‌شود که بتواند هوای داغ را از میان منفذ مغزه بدمد.

جهت ایجاد دمای سطح یکنواخت، حتی در شرایطی که مغزه تقارن چرخشی نداشته باشد، باید وسیله انطباق دریچهٔ ورودی هوای داغ در داخل استوانه رشته پیچ وجود داشته باشد. به‌طور مثال:

ــ تغییر در منفذ دریچه

ــ ورودیهای هوای داغ در هر دو طرف

امکان دیگر احاطه کردن مغزه تا دریچه ورودی پیش آغشته با ورودی گاز داغ اضافی است.



شکل ۸ ــ اصول گرمایش مغزه

پارامترهای فراورش برای پیش‌آغشته‌های رزین پلی‌اورتان *(UP)*

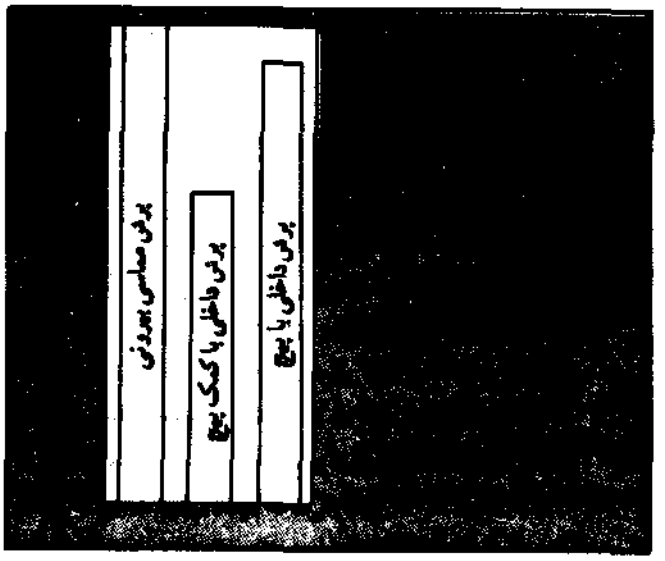
در فراورش پیش‌آغشته‌های لیفی، کیفیت قطعه بستگی به پارامترهای فراورش قابل تنظیم در موقعی دارد که چند لایه‌ای برای اولین‌بار طی فرایند رشته پیچی ایجاد می‌شود.

(الف) پرش (آغاز) پیچیدن

در رشته پیچی، نوع پرش (داخلی، خارجی) از ماسوره و پیچیدن مارپیچ بر خواص بعدی چندلایی اثر می‌گذارد. یک پیچ احتمالی چندلایه‌ای منجر به غیریکنواختی می‌شود و می‌تواند برخی خواص ماده را تضعیف کند.

ماسوره‌های پرش خارجی مانع از پیچش چندلایه‌ای می‌شوند. برای پرش داخلی ماسوره‌ها باید چرخش مخالف داشته باشند که نیاز به یک وسیلهٔ ساده گرداندن دارد. ماسوره‌ها با پیچ مخالف یا کمک‌پیچ به وسایل پیچ‌بازکن نیاز ندارند. مفهوم مشابهی توسط پاک *(Puck)* پیشنهاد شد. در اینجا وسیلهٔ نگهداری بغرنج ماسوره با وسیلهٔ محرک یا ترمز به‌کار برده نمی‌شود. ماسوره‌های داخلی پرش بر روی ماشین رشته‌پیچ به گونه‌ای تهیه می‌شوند که یک پیچ منفی در پیچیدن مارپیچ بوجود آید و پیچ در حال وقوع در پرش داخلی را توازن بخشد.

بررسیهای ما نتایج جالب توجهی را در ارتباط با خواص چندلایه‌ای با پیچ و بدون پیچ در نمونه‌های لوله یک‌جهته نشان می‌دهند. نمونه‌های با اشکال هندسی مشابه چندلایه‌ای لوله با رشته الیاف نتابیده دارای پرشهای مختلف مقایسه شدند. در حالی که برای بارها در جهت الیاف و بارهای برشی هیچ اختلاف قابل توجهی بین چند لایه‌ایها با پیچ و بدون پیچ مشخص نشده ولی استحکام پیچشی عرضی چندلایه‌ای همراه با پیچ حدود ۳۵ درصد زیر چند لایه‌ای عاری از پیچ قرار داشت *[13]* (شکل ۹).



شکل ۹ ــ خم شدن سه نقطه‌ای در جهت عرضی الیاف (DIN 53452) با پیچ و بدون پیچ

علت آن را می‌توان در ناهمگنیهای چندلایه‌ای در ناحیهٔ پیچش جستجو کرد؛ که می‌تواند به عنوان شروع تشکیل ترک در جایی تلقی شود که تنش کششی اعمال شده است.

مقادیر نسبتاً پایینتر پرش داخلی همراه با کمک پیچ در مقایسه با پرش خارجی توسط خمهای اضافی برای تولید استحکام الیاف نتایجه، توجیه می‌شود. اینک اثر پارامترهای اضافی فرایند بر کیفیت چندلایه‌ای با استفاده از نمونه پیش‌آغشته رزین پلی‌اورتان / الیاف شیشه ــ E روشن می‌گردد.

نمونه‌های اولیه قطعه از لوله‌های پیچیده شده با تنظیمهای مختلف ماشین ساخته شدند (جدول ۳ را ببینید).

جدول ۳ ــ پارامترهای مختلف فراورش برای پخت با ماورای بنفش پیش‌آغشته‌های شیشه ــ E پلی‌اورتان

سرعتهای پرش رشته	
کشش‌های پرش رشته	
دمای استوانه رشته‌پیچ	
فاصله از منبع تابش	
دورهٔ زمانی تابش	

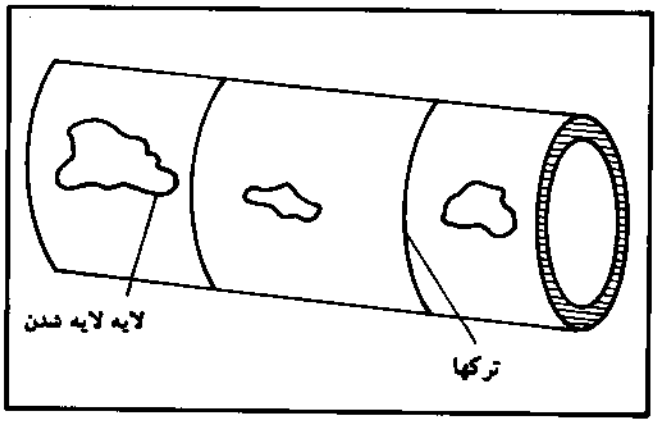
(ب) دما

کنترل دما نقش تعیین‌کننده‌ای در فراورش پخت ماورای بنفش پیش‌آغشته‌های الیاف شیشه E/ پلی‌اورتان توسط فرایند رشته پیچی با سرعت بالا دارد. دما، که توسط آن گرانروی ماتریس رزین تنظیم می‌شود باید به گونه‌ای کنترل شود که لایه‌های پیچنده شده چندلایه‌ای باهم جاری شوند و اتصالات بدون مسئله را تضمین کنند. با سرعت دوران بالای مغزه (۸۲۰ دور در دقیقه برای سرعتهای پرش ۳ متر بر ثانیه)، از جدا شدن رزین از مغزه باید جلوگیری شود، چون ساخت تکرارپذیر مستلزم تناسب حجمی الیاف ثابت است. این دو شرط با کنترل دمای مغزه در $40^{\circ}C$ قابل تحقق است.

در زیر $40^{\circ}C$ دمای مغزه، که به‌طور نمونه برای پیش‌آغشته‌ها ضروری است، هوا محبوس می‌شود و نقصهای پیوندی رخ می‌دهند که به صورت علامتهای روشن قابل رؤیت‌اند. همچنین وقتی دمای مغزه کاهش می‌یابد، جدا شدن از قالب هم آسانتر می‌شود زیرا انقباض حجمی به دلیل واکنش پخت ماتریس بزرگتر از انقباض گرمایی مغزه در لحظه تکمیل فرایند رشته پیچی است. توزیع یکنواخت دما در جهت محوری چندلایه‌ای از صدمه دیدن چندلایه‌ای هنگام پخت جلوگیری می‌کند. شکل ۱۰ چنین نقصهایی را روی یک قطعه نمونه نشان می‌دهد.

(ج) کشش پرش

کشش پرش رشته بر کیفیت چندلایه‌ای اثر می‌گذارد. آزمونهای



شکل ۱۰ ــ صدمه دیدن چند لایه‌ای روی نمونه‌های اولیه

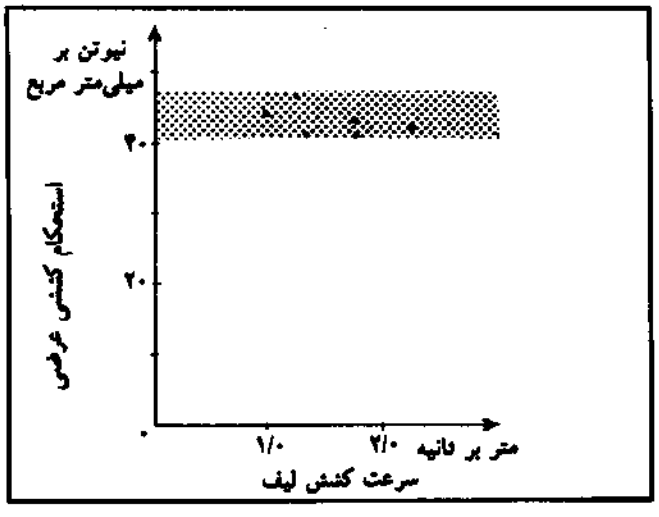
کششی بر روی لوله‌هایی با رشته پیچی لبه‌ای تام، با پرش رشته ۱۳ نیوتن بر ۲۴۰۰ تکس (Tex)، استحکام کششی عرضی بالاتر از ۵۰ نیوتن بر ۲۴۰۰ تکس به دست داد. استحکامهای کششی عرضی بهینه ۴۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع از کششهای پرش رشته ۴۰ نیوتن بر ۲۴۰۰ تکس نتیجه شده‌اند (در آزمونهای مقایسه‌ای).

(د) سرعت پرش

سرعتهای مختلف پرش رشته بر استحکام کششی عرضی چندلایه‌ای جایی که کشش رشته یکسان بماند، هیچ تأخیری ندارد (شکل ۱۱) *[9]*.

(ه) میله‌های راهنمای رشته

عناصر راهنمای رشته در پیچیدن با پیش‌آغشته‌های رشته حداقل در چشم ماکو که پیچیدن روی سطح مغزه را راهنمایی می‌کنند لازم می‌باشند. میله‌های راهنمای رشته باید مقاومت سایشی بالا و ضریب اصطکاک پایین داشته باشند که عمر خدماتی طولانی حاصل شود و پیش‌آغشته رشته را بدون صدمه دیدن راهنمایی کنند. آزمونهای روی



شکل ۱۱ ــ استحکام کششی عرضی به صورت تابعی از سرعت رشته

عناصر راهنمای رشته نشان داده‌اند که پلی‌تترا فلوئورواتیلن *(PTFE)* تثبیت شده کمترین تأثیر را بر چندلایه‌ای در مقایسه با فولاد (تراش داده شده و صیقل داده شده)، پلی‌آمید و سرامیکها *(Al_2O_3)* دارد.

تجربیات با پیش‌آغشته‌های گرمانرم

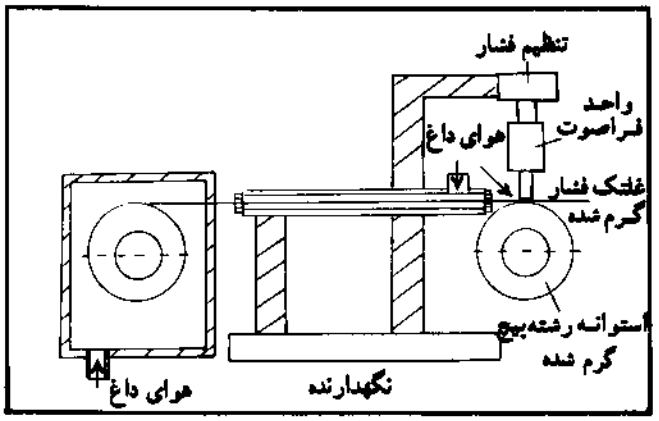
گرمانرمهای تقویت شده لیفی به جای گرماسختهای لیفی برای کاربردهای مختلف به‌ویژه به دلیل میزان بالای چقرمگی پیشنهاد شده‌اند *[14]*. سایر مزایا و معایب ماتریس گرمانرم در مقایسه با ماتریس گرما سخت در فراورشش نهفته است (جدول ۴ را ببینید).

توجه زیادی باید به فرایند گرم کردن و کنترل دما در ماتریسهای گرمانرم مبذول شود. زیرا آنها اثر متناسب بر خواص مکانیکی و سرعت فراورش دارند. دمای فراورش ماتریس پلی اتراترکتون *(PEEK)* گرمانرم، ماده‌ای که بیش از همه مورد بحث قرار گرفته است و دمای تبلور آن $^{\circ}C$ ۲۴۰ است، بالاتر از $^{\circ}C$ ۳۵۰ قرار دارد. این امر به طور ویژه در مورد استوانه رشته پیچ، جایی که در آن گرمادادن، ذوب، فراورش (جوش خوردن) و خنک کردن همزمان صورت می‌گیرد، صدق می‌کند *[15,16,17,18]*.

پیش آغشته دیگری با یک ماتریس گرمانرم مقاوم در برابر دما از پلی‌اتر سولفون *(PES)* دمای فراورش حدول $^{\circ}C$ ۳۳۰ دارد *[12]*. برای رسیدن به این دما در پیش آغشته، چند فرایند گرمادهی با مزایای مختلف می‌تواند درنظر گرفته شوند (جدول ۵). مواردی که موفقیت بیشتری را نوید می‌دهند مورد بحث قرار می‌گیرند.

برای گرمادهی با فرکانس بالا، جذب ویژهٔ ماده توسط پلی اتر سولفون تنها کافی نیست، با این نتیجه که لازم است با دودهٔ فعال در فرکانس بالا مخلوط شود *[19]*. لازم است که راهنمای بدون ارتعاش پیش آغشته رشته، در محور لولهٔ میدان فرکانس بالا، باشد.

یک روش گرمادهی اضافی، گرمادهی فراصوت است که از حیطه جوش دادن پلاستیکها شناخته شده است. شکل ۱۲ *[20]* یک ترتیب

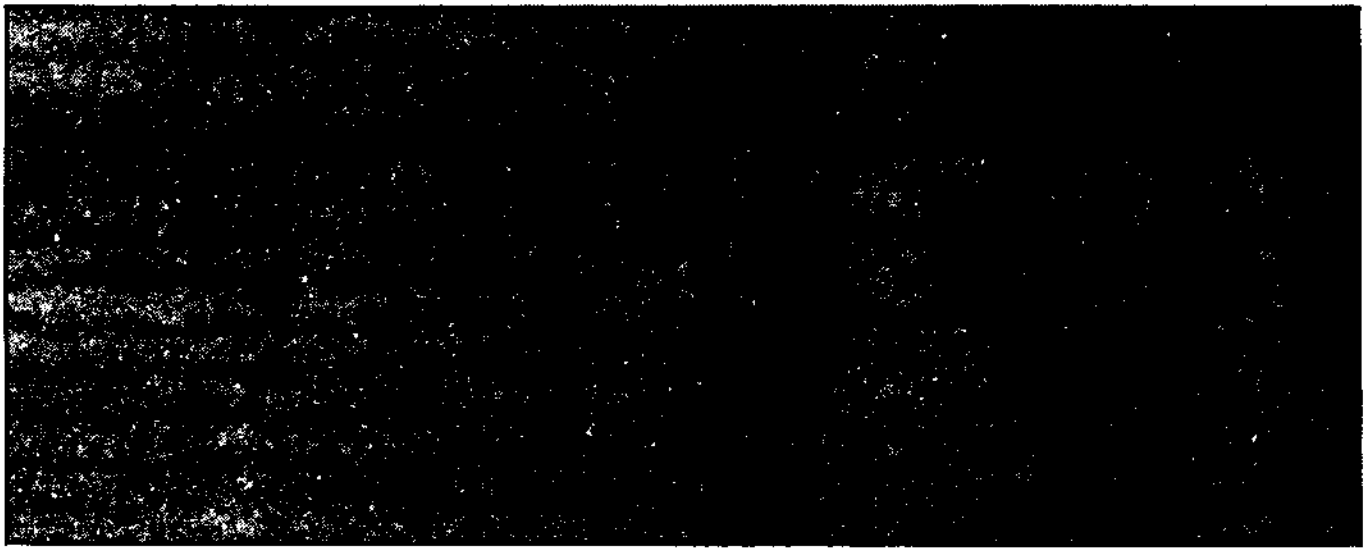


شکل ۱۲ ــ تجهیزات رشته پیچی با گرمادهی فراصوت پیش آغشته

آزمایشی برای فرایند رشته پیچی را نشان می‌دهد. نظر این است که گرمادهی رشته‌های پیش آغشته باید بین ماسوره، مسیر رشته، مغزه و پرش توزیع شود. رشته پیش آغشته توسط همرفت تا $^{\circ}C$ ۱۰۰ گرم می‌شود و در مرحلهٔ پرش توسط فراصوت بین یک سونوترود *(Sonotrod)* و یک قالب گرم شده جوش می‌خورد. در پیچیدن پیش آغشته، سطح پیش آغشته می‌تواند توسط اصطکاک سونوترود روی پیش آغشته و روی رشته‌ها صدمه ببیند. عوامل مهم برای فراورش پیش آغشته گرمانرم عبارت‌اند از: سطح مقطع مستطیلی و آغشتگی کامل الیاف.

برای گرما دادن توسط گرمکنهای زیر قرمز، تابش‌دهنده‌هایی با نیمرخ بازتابندهٔ بیضوی مناسب‌اند. پیش آغشته شبه نوار با سطح مقطع

جدول ۴ ــ کیفیتهای فراورش پیش‌آغشته‌های رشته پیچی



جدول ۵ ــ روشهای گرمادهی برای پیش آغشته‌های لیف شیشه گرمانرم

هوای داغ	هوای داغ تا حدود ۵۰۰°C که از اکسایش در ماتریس جلوگیری می‌کند، با دمای سطح ۳۶۰°C فقط تا سرعت ۷۰، 10^{-2} متر بر ثانیه	گرمادهی ناکافی داخلی، گرادیان دمایی بالا با استفاده از گاز بی‌اثر از اکسایش جلوگیری می‌شود	گرمادهی سریع برروی کفشکهای گرفته (۱ متر به نظر غیرممکن می‌رسد.
تماس	چسبندگی قوی به صفحه گرمادهنده	دمای تماس بسیار بالا لازم است انتقال گرما کم است	فقط برای سرعتهای آهسته پرس یا کفشکهای تماس طولانی
فرکانس بالا	گرمادهی اندک است	ضریب تلاف (۰/۰۰۲ ــ ۰/۰۰۴) بسیار کم از میدانهای فرکانس خیلی بالا جلوگیری می‌شود	فقط موقعی موردنظر است که با یک فعال‌ساز تقاطع شود
فراصوت	سرعت گرمادهی در آزمونهای ایستای جوش دادن (متصل کردن) خوب است	جوش دادن فراصوت پیوسته در ماده پیش آغشته به شکل نوار، سطح امکان‌پذیر است، سرعت پرس آهسته است	در حال توسعه است به دلیل امکان خرابی پیش آغشته در پرس آهسته پیش آغشته
لیز CO_2	با ۷۰۰/۱۶ متر بر ثانیه و ۱۲×۱۲ = ۷ میلی‌متر بر دقیقه توان لازم برای ذوب کامل حاصل نیست. تغذیه کم شده پایین گرمارسانایی پایین است. ــ سوختن موضعی الیاف ــ درجه بازدهی خوب فقط با تابش عمودی ــ سطح مقطع گرد لیف مناسب نیست	جذب تابش در توده ماده کمتر موردنظر است تا روی سطح ماده	برای پیش آغشته‌های مسطح با سطح مقطع مربع توزید داده است

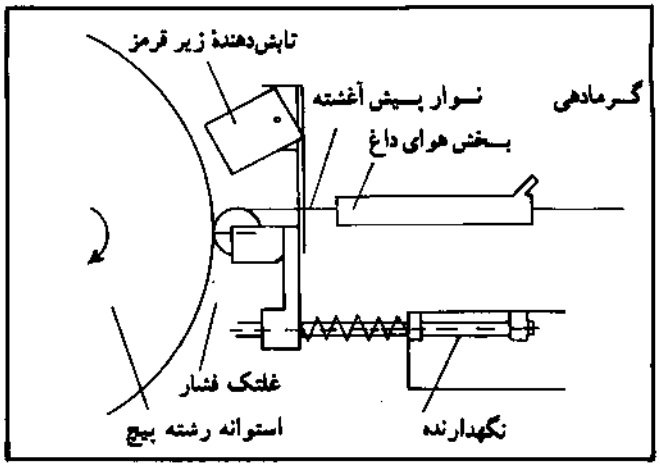
نازک و یک حالت یکنواخت ماده در میزان بالای جذب ماده ماتریس گرمانرم، برای گرمادهی خوب مناسب است. میزان کارایی واحد تابش‌دهنده می‌تواند توسط یک بازتاباننده اضافی بهبود یابد و در آزمایشها با یک پیش آغشته پلی‌اتر اترکتون بازدهی ۹۰ درصد بود [18]. در میان سایر آزمونها، برخی آزمونها روی رشته پیچی پیش آغشته پلی‌اتر اترکتون / فلوئوروکربن در فرایند رشته پیچی نشان داده‌اند که به همراه با یک گرمکن استوانه رشته پیچ، گرمکنهای تابش زیر قرمز برای گرم کردن بیشتر سطوحی که قرار است بین پیش آغشته پیچانده شده و پایه پیش‌آغشته متصل شوند، کاملاً مناسب‌اند [18, 19, 21, 22].

استفاده از هوای داغ برای گرمادهی الیاف پیش آغشته، به دلیل گرمارسانایی ضعیف در داخل پیش آغشته احتیاج به دوره‌های زمانی طولانیتر گرم کردن در مقایسه با روشهای دیگر گرمادهی دارد:

مناسبترین سطح مقطع پیش آغشته دارای مساحت سطح بسیار بزرگی است و بنابراین بسیار تخت است. دماهای هوای داغ توسط طیف دمای اکسایش پیش آغشته تعیین می‌گردند. استفاده از گاز بی‌اثر دماهای هوای داغ را تا حدّ گسستن مجاز می‌سازد.

استفاده مشترک گرمادهی با هوای داغ و تابش می‌تواند نتایج بهتری ارائه دهد، چون که از خواص فرایند بهتر بهره‌برداری می‌شود [23]. در این روش، پیش آغشته رشته‌ای در یک بخش گرمادهی توسط همرفت تا زیردمای ذوب گرم می‌شود؛ گرمکن تابشی ناحیه سطوح متصل‌شونده را در استوانه رشته پیچ تا دمای ذوب گرم می‌کند، به طوری که رشته پیش آغشته روی مذاب پیچانده می‌شود [22]. شکل ۱۳ ترتیب اساسی را نشان می‌دهد. تابش‌دهی شکاف اتصال مفید به نظر می‌رسد، ولی در اینجا تنها از یک لیزر می‌شود استفاده کرد، که می‌تواند از عهده مسافتهای متغیر بین گرما و شکاف اتصال حین پیچاندن توسط عرض متمرکزشوندهٔ آن در چگالی (شدت) بالای انرژی برآید.

می‌توان ثابت کرد که در فراورش پیش آغشته‌های گرمانرم توسط رشته پیچی، هر طرح رشته پیچی نمی‌تواند چندلایه‌ای خوبی تولید کند. شکل ۱۴ دلایل آن را نشان می‌دهد. در حالی که چندلایه‌ای از پیش‌آغشته‌های مستقر به صورت نوار به نوار، انتقالهای تمیز، نرم و بدون



شکل ۱۳ ــ گرمادهی مشترک تابشی و همرفتی پیش آغشته‌های گرمانرم

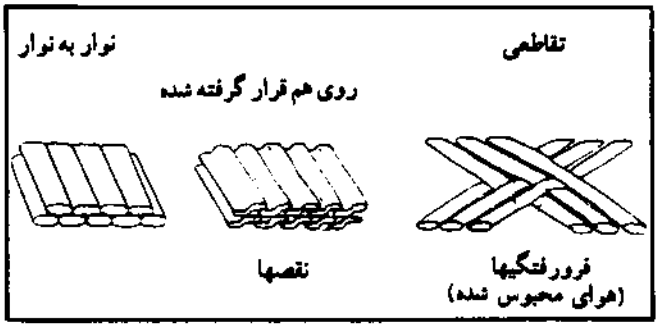
سوراخ نشان می‌دهد، نقصهایی در فن روی هم قراردهی، به خصوص با طرحهای رشته پیچی تقاطعی که رشته‌ها به حدّ کافی جوش نخورده‌اند، رخ می‌دهد. این اثر را می‌توان توسط گرانروی بالای فراورش ماتریسهای گرمانرم توضیح داد که منجر به یک میزان بالای سختی پیش‌آغشته حین رشته پیچی می‌شود.

در حالی که رشته پیچی پیش‌آغشته‌های گرمانرم مقاوم در برابر دمای بالا هنوز در مراحل اولیه‌اش می‌باشد، پیش‌آغشته‌های گرماسخت موجود در بازار از لحاظ فرایندپذیری در سرعتهای بالای پرش رشته معتبر شناخته شده‌اند [21].

گرمانرمهای تقویت شده با نمد و شیشه (*GMT*)

گرمانرمهای تقویت شده با نمد و شیشه به عنوان محصولات نیمه آماده مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای تشکیل قطعات بزرگ که برای مثال در ساخت اتومبیل به کار می‌روند در قالبها زیر فشار قرار می‌گیرند. تقویت کردن توسط نمد و شیشه به محتوای لیف ۲۰ درصد تا تقریباً ۴۰ درصد وزنی می‌رسد.

در اصل، تمام مواد گرمانرم به عنوان ماتریسها مناسب هستند، به



شکل ۱۴ ــ ساختارهای چندلایه‌ای از طرحهای رشته پیچی مختلف با پیش آغشته‌های گرمانرم

شرط اینکه گرانروی مذاب به اندازهٔ کافی پایین باشد که پیش‌آغشته شدن نمدها امکان‌پذیر شود. به علاوه، تر شدن و چسبندگی کافی به لیف مورد نیاز است. تا حالا تنها سه نوع ماده ماتریس پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌آمید ۶ [24-29] به طور موفقیت‌آمیزی به کار برده شده‌اند. در جدول ۶ مقادیر نمونه و توزیع آنها برای محصولاتی ارائه شده است که توسط قالبگیری سیال یا فشاری از گرمانرمهای تقویت شده با نمد و شیشه همراه با شش ماتریس مختلف ساخته شده‌اند [24, 28, 29].

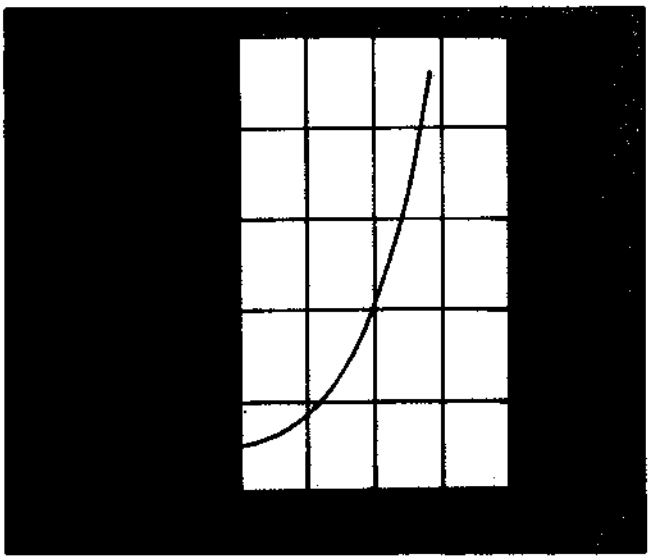
جدول ۶ ــ خواص محصولات به دست آمده از GMT با مواد ماتریس مختلف (مقدار شیشه ۳۰ درصد وزنی)

	۱/۱۲	۱/۳۵	۱/۶
	۳۵ ــ ۳۰		
	۷۰ ــ ۵۰	۹۰ ــ ۷۰	تقریباً ۹۵
	۲ ــ ۱/۴	۴ ــ ۳	۴ ــ ۳
	۵ ــ ۴	۶/۵ ــ ۴	تقریباً ۸۴
	۱۳۰	تقریباً ۱۸۰	بیش از ۲۰۰
		تقریباً ۵۲۵	۷۰۰ ــ ۶۵۰

برای تولید پیوسته محصولات نیمه آماده از گرمانرمهای تقویت شده با نمد و شیشه، فرایند اصلی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد (با توجه به اطلاعات انتشار یافته) اکستروژن مذابهای گرمانرم و به دنبال آن پیش آغشتن نمد شیشه توسط مذاب پلیمر داغ در مسیر فراورش است.

تولید پیوسته محصولات نیمه‌آماده از پلی‌آمید ۶ تقویت شده با نمد و شیشه

اساس این پیشرفت فکر استفاده از پلیمر کردن آنیونی فعال شده و پیوسته ε ــ کاپرولاکتام پلیمر شده با گرانروی پایین ساخته می‌شود تا ساختار لیفی تقویت‌کننده را آغشته کند. ماتریس به میزان بالایی پس از آغشته شدن پلیمر می‌شود. واکنش در اکسترودر شروع می‌گردد و در یک واحد جداگانه ادامه می‌یابد. پیش‌آغشته شدن باید با سرعت واکنشی انجام شود تا تضمین کند که گرانروی مذاب هنوز به اندازه کافی پایین است. شکل ۱۵ به وضوح افزایش گرانروی تعیین شده توسط واکنش را در



شکل ۱۵ ــ گرانروی در برابر زمان واکنش

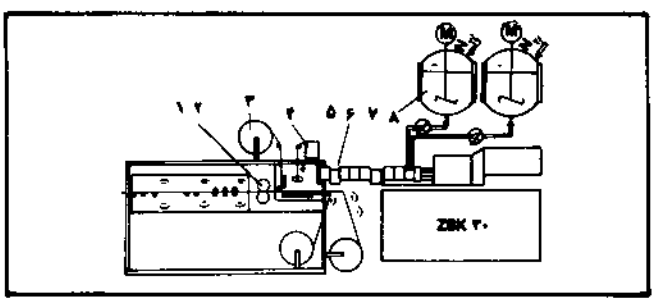
ارتباط با زمان واکنش نشان می‌دهد [30]. واضح است که فقط یک مدت زمان کوتاه برای پیش‌آغشته شدن در یک گرانروی حدود ۱۰۰ mPas در دسترس است.

برای دستیابی به تولید پیوسته با این روش، ZSK با اندازه‌گیری میزان مایع به کار برده می‌شود. اکسترودر نقش آغازکننده واکنش را دارد و یک مذاب واکنش‌دهنده، تکرارپذیر، با سرعت واکنشی که هنوز پایین است تهیه می‌کند. زمان واکنش اضافی در تجهیزات پیش‌آغشته‌ساز تا نقطه رسیدن به حداکثر سرعت واکنش، بسته به شرایط فرایند، می‌تواند بین ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه تنظیم شود [32 , 31].

وقتی اکسترودر به این طریق در مقابل پلیمر کردن آنیونی فعال شده ε ــ کاپرولاکتام به مواد کاملاً پلیمر شده به کار برده شود، طول پیچ می‌تواند تا حدود $L = 8D$ کاهش یابد. مذاب واکنش دهنده چه در اکسترودر یا هنگام پیش آغشته شدن بعدی به دمای مذاب پلی‌آمید نمی‌رسد. مذاب کاپرولاکتام بی‌درنگ به یک جامد نیمه بلوری تبدیل می‌شود. برای جلوگیری از چسبندگی و واکنش بیشتر ذرات مذاب هنگام برداشتن از اکسترودر، مذاب در «۲۰۴ میلی‌متر = مؤثر L» به طور عمودی و به طرف پایین از میان یک منفذ استوانه اکسترودر برداشته می‌شود و به داخل دستگاه پیش آغشته‌ساز تغذیه می‌گردد. مارپیچها در قسمت بالا توسط واحدهای مارپیچ با جهتهای تغذیه مخالف، خود به خود به هم گرفته می‌شوند، که نتیجهٔ آن مارپیچهای همسوگرد با درزگیری نزدیک که توانایی تمیز کردن خود را، حتی در ناحیه برداشت مواد، حفظ می‌کنند.

نمودار کل واحد صنعتی تولید کننده ورقه‌های تقویت شده با نمد شیشه‌ای از پلی‌آمید ۶ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. ZSK(۸) پیش پلیمر واکنش دهنده را به داخل دستگاه پیش آغشته ساز تغذیه می‌کند که این ماده روی غلتک (۶) ساخته شده از کاغذ ریخته می‌شود که توسط گرمکنهای تابشی زیر قرمز گرم می‌شود. این غلتک نمد شیشه (۷) از قبل گرم شده را به داخل دستگاه پیش آغشته‌ساز می‌کشد. هنگام واکنش، کامپوزیت توسط راهنمایی (۵) از ورقه فلز که با روغن گرم شده است، نگهداری می‌شود. چون واکنش به اکسیژن اتمسفر و رطوبت حساس است، واکنش در اتمسفر آرگون خشک انجام می‌گیرد. نمد همراه با ماتریس پلیمر شونده با یک نوار کاغذ پوشانده و سپس از میان یک دستگاه اعمال فشار (۲) عبور داده می‌شود که محصول را متراکم می‌سازد. سپس محصول نیمه آماده در بخش گرمادهی زیر قرمز (۱) در دمایی به قدر کافی بالا (تقریباً ۱۶۰°C) نگهداشته می‌شود، تا اینکه پلیمر شدن ماتریس تکمیل گردد. در روش جانشینی فراورش نمدهای شیشه، نوارهای رشته الیاف نتابیده پیش گرم شده که توسط وسیله برشی بریده شده‌اند (۴) می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [33].

بر روی نمونهٔ اولیه این واحد صنعتی که جهت کاربرد آزمایشگاهی ساخته شده است، تولید بیشینه ۱۲ کیلوگرم بر ساعت را می‌توان با محتوای بیشینه شیشه حدود ۳۰ درصد وزنی [30] به دست آورد. ورقه‌های تولید شده عرض ۱۶۰ میلی‌متر و ضخامت بین ۶ ــ ۲/۵ میلی‌متر دارند. مسیر واکنش پلیمر شدن ماتریس با سرعت ثابت برگشت توسط مکانیسمهای کنترل دما در دستگاه پیش آغشته‌ساز کنترل می‌گردد.



شکل ۱۶ ــ تولید پیوسته پلی‌آمید ۶ تقویت شده با نمد شیشه

۱ ــ بخش گرمادهی زیر قرمز
۲ ــ غلتکهای گیرنده
۳ ــ غلتک پوشاننده
۴ ــ واحد برش الیاف نتابیده
۵ ــ محفظه ریزش با راهنماهای فلزی ورقه‌ای
۶ ــ غلتک حامل
۷ ــ نمد شیشه
۸ ــ ZSK ۳۰ با اندازه‌گیری مایع

سازگاری بین عامل جفت کننده لیف شیشه‌ای مصرفی و واکنش یک پیش‌نیاز اساسی برای کیفیت مطلوب محصول است. بنابراین برای نمونه الیاف با عامل جفت کننده آب دوست نامناسب هستند. پیش گرم کردن نوارهای کاغذ، که بعداً برداشته می‌شوند، و نمدهای لیف شیشه یا رشته الیاف نتابیده از اهمیت تعیین کننده‌ای برخوردار است. باید آنها وقتی در تماس با ماتریس واکنش دهنده قرار می‌گیرند به اندازهٔ کافی داغ باشند، تا اینکه واکنش در بعضی جاها متوقف نگردد. تجربیات نشان می‌دهند که الیاف و نوارهای کاغذ لازم است که یک دمای سطح حداقل ۱۶۰°C داشته باشند تا عملکرد مطلوب وسایل و خواص مورد قبول محصول تضمین گردد [32]. در غیر این صورت نتیجه چسبندگی ضعیف لیف توسط ε ــ کاپرولاکتام رسوب شده روی لایه مرزی خواهد بود.

ادامه دارد...