ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها

عملیات تراش، برشکاری، فرزکاری و سوراخ‌کاری، یکی از بخش‌های مهم ساخت قطعات کامپوزیتی پس از شکل‌دهی آنهاست. معمولاً مهندسین فرایند، زمان و منابع زیادی را صرف طراحی، انتخاب مواد و فرآیند ساخت قطعه می‌نمایند تا یک محصول بی‌نقص تولید شود. اما در بسیاری از مواقع در مورد قطعهٔ ساخته شده باید حذف زواید (trim)، برش و یا اتصال انجام می‌گیرد که در این صورت سازنده را با چالش‌های زیادی روبرو می‌کند.

اگرچه می‌توان کامپوزیت‌ها را با اتصالات یکپارچه طراحی نمود ولی در مورد اتصالاتی که در معرض تنش بالایی قرار دارند و یا اتصالاتی که در چرخه‌های زمانی معین باید از هم باز شوند، از اتصالات مکانیکی استفاده می‌شود. علاوه بر حذف زواید و فرزکاری قطعه، به منظور دستیابی به یک سطح صاف، قطعات مورد استفاده (مثلاً اجزای هواپیما) نیاز به هزاران سوراخ‌کاری دارند. سوراخ‌ها در این موارد به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل می‌کنند و می‌توانند با بهم‌زدن مسیر نیروی وارد بر الیاف، اثر تعیین‌کننده‌ای بر استحکام، سفتی و کارایی کامپوزیت‌ها بگذارند. بیشتر روش‌های ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها ساینده (Abrasive) هستند که به مرور زمان روش‌ها و ابزارهای خاصی برای این کار ابداع شده است.

ازآنجاییکه در کامپوزیت‌ها، الیاف با استحکام بالا به راحتی نمی‌شکنند، در آنها گرایش به بیرون کشیده شدن توسط ابزار ماشین‌کاری وجود دارد که خود منجر به ایجاد ترک‌های کوچک و جدایش لایه‌ها در طول برش می‌شود. در مورد الیاف چقرمه آرامید که استحکام برشی بالایی دارند، در امتداد برش یا سطح ماشینکاری، الیاف ریش ریش می‌شوند. همچنین گرمای بیش از حد تولید شده در موضع برش یا سوراخ‌کاری، ممکن است دمای رزین را به بالای دمای انتقال شیشه‌ای آن (T_g) برساند و سبب تخریب موضعی کامپوزیت گردد.

علاوه بر این، خود ابزارهای ماشینکاری نیز بایستی مورد ارزیابی قرار بگیرند. ترکیب ناهمگون کامپوزیت، ابزار را با مقاومت‌های مختلفی از طرف الیاف سخت و رزین نرم مواجه می‌کند که منجر به اعمال تنش به ابزار می‌گردد. تفاوت‌های زیر در ماشینکاری کامپوزیت‌ها و فلزات بیشتر مورد تاکید است:

- ضریب انبساط حرارتی متفاوت ماتریس پلیمری و الیاف در کامپوزیت، سبب حبس تنش در قطعه می‌شود و ماشینکاری می‌تواند این تنش‌ها را آزاد و سبب تغییر شکل ناخواسته و آسیب به قطعه شود.
- استحکام پایین بین لایه‌ها در یک کامپوزیت، می‌تواند سبب جدایی لایه‌ها و جدا شدن تکه‌هایی از کامپوزیت در لبه‌های قطعه شود. این نکته در کامپوزیت‌های با آرایش الیاف تک جهته از اهمیت بیشتری برخوردار است.
- ساختار ناهمگون و طبیعت چسبنده این مواد، سایش ابزار را زیاد می‌کند.
- اگر خروج براده‌های ماشینکاری توسط مایع خنک کننده مقدور نباشد، اینکار بایستی توسط مکش انجام گیرد. خطر این براده‌ها به خصوص در مورد کامپوزیت‌های کربن برای ماشین‌های الکتریکی واضح است.
- در صورت استفاده از آب به عنوان خنک کننده، امکان جذب رطوبت توسط آن و کاهش خواص کامپوزیت وجود دارد.

در این بخش انواع ابزارهایی که می‌توانند پاسخگوی این چالش‌ها باشند اعم از ساینده (ابزارهای کاربیدی، الماسه و جت آب) و غیر ساینده (لیزر، اسپارک، پرتو یون و میکروویو) و چگونگی استفاده از آنها به منظور دستیابی به بهترین نتیجه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

ابزارهای کاربیدی، راه‌حلی اقتصادی

برای سازندگان قطعات کامپوزیتی امکان استفاده از ابزارهای مختلفی از قبیل فولاد مقاوم، کاربید و الماس صنعتی برای برش و سوراخ‌کاری وجود دارد.

معمولاً کاربید در اکثر کاربردها انتخاب مناسبی است چون استحکام و دوام مورد نیاز برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها را داراست و در حالت تولید انبوه، اقتصادی است.

ابزار کاربیدی در مقایسه با الماس، سطح دقیق‌تر و تمیزتری ایجاد می‌نماید و به دلیل طبیعت ساینده‌ٔ کامپوزیت نسبتاً سریع ساییده می‌شود ولی عمر طولانی‌تری نسبت به فولاد دارد.

کاربید که قبلاً carbaloy نامیده می‌شد و در سال ۱۹۲۰ در آلمان بصورت مشترک توسط شرکت‌های جنرال الکتریک و کروپ به ثبت رسید، به خودی خود یک کامپوزیت محسوب می‌شود که مرکب از ذرات سایندهٔ کاربید تنگستن و نگهدارنده (binder) فلزی کبالت می‌باشد.

به منظور ساخت ابزار کاربیدی، بطور سنتی ذرات پودر با حلال و واکس پارافینی مخلوط شده به شکل استوانهٔ مته، فرز و سایر انواع ابزارها شکل داده می‌شود. سپس قطعهٔ ساخته شده در شرایط اتمسفر خنثی و دمای ۱۰۹۳°C تحت ذوب سطحی (سینتر اولیه) (presinter) قرار می‌گیرد تا شکل اولیه‌ای تحت عنوان کاربید خام (green carbide) ساخته شود.

در این مرحله، ماشین‌کاری کاربید به آسانی ممکن است و می‌توان سطوح زاویه‌دار را در آن ایجاد نمود. سپس قطعهٔ فوق مجدداً تا دمای ۲۷۶۰°C در شرایط سینتر قرار داده می‌شود تا محصول نهایی شکل گیرد. امروزه در نتیجهٔ وجود ماشین‌های CNC اغلب سازندگان ابزار برش، از مرحلهٔ کاربید خام صرفنظر کرده و از سازندگان کاربید بلوک آنرا خریداری نموده، به شکل ابزار دلخواه آنرا ماشین‌کاری می‌کنند. مواد شبه کاربید دیگر که آلیاژی با نام سرمت (cermet) است و حاوی فلز تیتانیم می‌باشد، وجود دارد.

برخی سازندگان، تکنولوژی ساخت ابزار را جادوگری می‌نامند و بیان داشته‌اند که سازندگان مختلف کاربید تنگستن با اضافه کردن فلزاتی چون وانادیم و تغییر درصد تنگستن و کبالت فرمولاسیون خاص خود را برای کارکرد در شرایط خاص بدست می‌آورند و بدینگونه تنظیم خواصی چون مقاومت سایشی، مقاومت در برابر شوک و نیز استحکام کششی انجام می‌شود.

تنگستن بیشتر به معنای مقاومت سایشی بهتر اما شکنندگی بیشتر است. درصد بیشتر بایندر کبالت، مقاومت در برابر شوک و ترک خوردگی قطعه را بالا می‌برد. به عنوان نمونه یک نوک مته یا فرز از جنس کاربید، استحکام پارگی در جهت عرض برابر با ۳۵۰ تا ۴۵۰ksi دارد که بالاتر از فولاد است و نزدیک به مقادیر مربوط به کامپوزیت‌های لیفی است. همچنین می‌توان پوششی روی قطعات اعمال نمود تا سختی سطح را افزایش دهد تا ضمن افزایش لغزندگی سطح و سهولت جداشدن ذرات ساییده شده از قطعه، ماتریس کاربیدی را حفظ کند. در برخی پوشش‌ها تیتانیم یا نیترید زیرکونیم را بدین منظور استفاده می‌کنند.

هندسه برش

منظور از هندسه برش، زوایا و شکل تیغهٔ برش‌زنی است که در آغاز برای ماشینکاری فلزات و چوب طراحی شده بود و وقتی برای ماشینکاری کامپوزیت‌ها بکار گرفته شد، مشکلاتی را از خود نشان داد. ابزارهای ماشینکاری فلزات با شیارهای خنثی یا حتی منفی (زاویه سطح برش‌زنی نسبت به سطح کار) طراحی شده‌اند تا فلز را خراش و دمای آنرا افزایش دهند و موجب نرمی فلز (Plastic Flow) و برش موثر آن شوند. این طراحی در مورد کامپوزیت‌ها بصورت معکوس عمل می‌کند؛ گرمای اضافه تولید می‌شود و سبب هل دادن الیاف به جلوی سطح برش می‌شود که در نتیجه فشار اضافه‌تری برای برش آنها و رخنه به داخل قطعه مورد نیاز است.

در مورد کامپوزیت‌ها شیار زاویه مثبت به دلیل برش آسانتر الیاف در آن زاویه و سهولت جدا کردن خردهٔ مواد از سطح و تولید گرمای کمتر، ترجیح داده می‌شود. هر سازندهٔ ابزاری، زاویه شیار و هندسهٔ برشی مخصوص به خود دارد که در اغلب موارد بصورت اختراع ثبت شده است. یکی از متخصصین ابزار برش کامپوزیت می‌گوید، ماشینکاری کامپوزیت‌ها شبیه پارو زدن برف است. اگر شما پارو را عمود بر برف بصورت صاف نگه دارید (شیار خنثی) نیروی زیادی صرف عقب زدن برف از آن نقطه خواهد شد و برف نیز تنها در جلوی پارو جمع می‌شود. در این حالت موثرتر این است که به پاروی خود یک زاویهٔ تند (شیار مثبت) بدهید و آنرا به زیر برف فشار دهید و آنرا از مسیر بروبید. سرعت چرخش و میزان خوراک دو عامل مهم در ماشین‌کاری دقیق و بدون افزایش دما می‌باشند.

خوراک‌دهی بالا چگونگی اتلاف حرارت را تعیین می‌کند و شکل ایده‌آل براده در ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها، ذرات خشک و پودر شدهٔ شکر مانند است. اگر سرعت چرخش بالا باشد و ذرات به سرعت از سطح روبیده نشوند، حرارت زیادی تولید

شده، خطر ذوب یا تخریب رزین و از بین رفتن قطعه و ابزار وجود خواهد داشت.

برخی سازندگان با انجام مکرر طراحی و آزمون، ابزارهای ویژه‌ای برای ماشینکاری کامپوزیت‌ها ساخته‌اند که تمام نکات گفته شده در آنها در نظر گرفته شده است. شرکت استارلایت (starlite) نوک مته، فرز، ارهٔ تریم، مته خزینه برداری (counter sinking) و سایر ابزارهای مخصوص کامپوزیت‌ها را از سال ۱۹۴۵ به بازار عرضه کرده است. این شرکت ابزارهای الماسه نیز تولید می‌کند. روش کار آن نیز، خرید بلوک کاربید و ماشینکاری با ابزار CNC است. یکی از تخصص‌های این شرکت ساخت نوک مته سوراخکاری کامپوزیت‌های آرامیدی است. برش آرامیدها به سختی انجام می‌شود و این شرکت دو ابزار برای اینکار عرضه نموده است: ۱- Brad point یا Forstner با سه لبهٔ برش متقاطع و شیاری حلزونی با زاویهٔ ۳۵^{o} به منظور براده برداری

۲- مته تک شیار که از دو لبه کار برش را انجام می‌دهد و اجازه می‌دهد هر لیفی بطور مجزا بریده شود و فشار مته لازم برای سوراخکاری و حرارت حاصله کاهش یابد. این روش جدایی لایه‌ها را در ورق‌های آرامیدی کاهش می‌دهد. به منظور دستیابی به دقت مورد نیاز در ماشینکاری قطعات مورد استفاده در صنایع هوافضا، که اندازهٔ سوراخ به منظور تطبیق با بست‌های مورد استفاده اهمیت دارد، انعطاف ناپذیری (rigidity) بیش از سرعت چرخش اهمیت دارد. قطعه بایستی به منظور جلوگیری از حرکت، کاملاً با گیره و فیکسچر محکم شود. درصورت کاربرد دریل دستی، استفاده از یک بوش قرار گرفته در یک قالب، روی سوراخ توصیه می‌شود تا ابزار را عمود نگهدارد و از حرکات جانبی جلوگیری نماید و ریسک افزایش قطر سوراخ از بین برود. شرکت ابزارهای مصرفی را مجدداً تیز می‌کند تا از تحمیل هزینه‌های اضافی بر مشتریان بکاهد.

شرکت Onsrud cutter نیز ابزارهای ماشینکاری برای صنایع مختلف از جمله کامپوزیت‌ها تولید می‌نماید. از جملهٔ این ابزارها نوک فرز کاربیدی برای حذف زواید قطعه یا ایجاد لبهٔ صاف برای عملیات‌های ثانویه مانند اتصال سطوح می‌باشد.

این شرکت، کاربید مورد استفاده را از شرکت اتریشی Bohlerit خریداری و با ماشین‌کاری از آنها ابزار می‌سازد.

اخیراً شرکت اُنسرود سه نوک مته جدید به بازار عرضه نموده است، که هر کدام مناسب یک نوع کامپوزیت است. سر مته UnRuffer که شبیه ابزار سنگ‌انگشتی (burr) کامپوزیت‌ها است، که دو شیار حلزونی در آن وجود دارد که در دو جهت قطع شده است (شکل ۱).

شکل ۱- سه نوع سر فرز مخصوص ماشینکاری کامپوزیت‌ها محصول شرکت اُنسرود (سمت راست: CG-Style، وسط: FMR و سمت چپ: UnRuffer)

این آرایش، یک طرح الماس گونه از نقاط برش زننده ایجاد می‌کند که براده‌های کوچک را بر می‌دارد. برای برشکاری ورق‌های ساندویچی سر مته، لبه‌های ریزتری (Fines) نسبت به سنگ‌انگشتی (burr) دارد و خطر جدایش لایه‌ها را کاهش می‌دهد. فرز کربن یا نوک متهٔ CG-style دارای چند شیار عمیق‌تر بوده که آنرا مارپیچ تراکم بالا / پایین (up/down compression spiral) می‌نامند. این شیارهای با عملکرد دوگانه، براده‌ها را به سمت مرکز برش هدایت می‌کنند و سطوح برش بیشتری را برای یک برش بی‌نقص فراهم می‌کنند. ابزار FMR برای کامپوزیت الیاف آرامید طراحی شده و دارای شیارهای بازتر و بزرگتر با دندانه‌های اصلاح شده می‌باشد.

شرکت International carbide محصولات سوراخکاری منحصر به فردی برای کامپوزیت‌ها ابداع نموده است. یکی از آنها ابزار سوراخکاری با نام Hole-O-Magic است که متشکل از سر مته، بوش نگهدارنده و قسمت چرخان آن است که برای ایجاد سوراخ‌های مشابه در کامپوزیت‌های الیاف شیشه کربن

استفاده می‌شود. محصولات این شرکت دارای لبه‌های مثبت (Positive rake) می‌باشند تا برش موثر الیاف را انجام دهند و از فشار زیاد که منجر به خرد شدن رزین می‌شود، جلوگیری شود. کاربرد خاص و سرعت مورد نیاز عملکرد، دو عامل مهم در انتخاب ابزار برش می‌باشد. به عنوان نمونه، یک سازنده، با استفاده از فرز الماسه در مدت ۵ دقیقه زواید یک قاب پنجره را که طول مسیر آن ۱۵۰cm بود، حذف می‌کرد. همین‌کار با استفاده از فرز کاربیدی که لبه‌های مثبت داشت، در مدت ۱ دقیقه انجام شد. اما سر فرز ۵۰ دلاری پس از سه هفته فرسوده می‌شد و یک موتور ۰/۵ اسب بخار آنرا به حرکت در می‌آورد درحالیکه سرفرزکاربیدی ۱۵ دلاری به مدت ۸ ساعت کار می‌کرد و موتوری با حجم یک سوم موتور قبلی و از نظر وزن سبکتر نیاز داشت. علیرغم زودتر ساییده شدن ابزار کاربیدی، دستیابی به تولید سه برابر در این حالت، توجیه کافی را برای تغییر ابزار الماسه به کاربیدی فراهم می‌کند.

موتورهایی که چرخش ابزار را برعهده دارند الکتریکی یا پنوماتیک هستند و جداگانه به فروش می‌رسند. شرکت Andrews Tool موتورهای دریل پنوماتیک مخصوص صنایع هوافضا می‌سازد. به عقیدهٔ این شرکت، موتورهایی که با هوای فشرده کار می‌کنند، راه حل بهتری برای کامپوزیت‌های کربن هستند، چراکه علیرغم جمع‌آوری براده‌های برش، ذرات کربن پراکنده شده می‌توانند برای موتورهای الکتریکی مشکل ایجاد کنند. همچنین سیستم‌های برش فوق مجهز به خوراک‌دهی خودکار بوده، نیازی به اعمال فشار از طرف کاربر ندارند. فشار اضافه می‌تواند سبب شکم دادن و جدایش لایه‌ها (blow up) در طرف دیگر ماشینکاری شود. همچنین موتورهای این دریل‌ها مجهز به سیستم خلاء به منظور جمع‌آوری براده‌های برش هستند.

آیا ابزارهای الماسه بهترینند؟

الماس سخت‌ترین مادهٔ جهان است و جایگزین گرانتر و کاراتری برای ابزار کاربیدی محسوب می‌شود. ابزارهای الماسه عمر طولانی‌تری نسبت به کاربید دارند که در برخی موارد به صدها برابر آن می‌رسند. الماس بصورت صنعتی نیز ساخته می‌شود که به آن الماس پلی‌کریستالی صنعتی (polycrystalline diamond یا PCD) می‌گویند و برخی از سازندگان آن عبارتند از: Debeers، Diamond Innovation و Sumiton Electric.

یک ابزار الماسه از چسباندن یک لایهٔ نازک (کمتر از ۱ میلی‌متر) الماس به سطح ساخته می‌شود (شکل ۲).

شکل ۲– ذرات الماس چسبانده شده به سطح ابزار به روش آبکاری (به شیارهای صاف در این نوع ابزارها در مقایسه با ابزارهای کاربیدی توجه شود)

رمز این کار در چسباندن است و روش‌های مختلفی برای این کار ابداع شده است که مرسوم‌ترین و کم هزینه‌ترین آنها آبکاری است. در این روش ابزار فلزی در محلول نیکل حاوی ذرات معلق الماس (مصنوعی یا طبیعی) غوطه‌ور می‌شود و بدینوسیله با لایهٔ آبکاری به سطح فلز می‌چسبد.

به گفته یکی از متخصصین ابزار سازی، در این روش الماس‌ها به تدریج چسبندگی خود را از دست می‌دهند و از سطح کنده می‌شوند. روش کاراتر، اتصال ذرات الماس به سطح فلزی با روش‌های دیگر آبکاری (یا سینترینگ) مانند Brazing و soldering است. به این ترتیب، الماس توسط لایهٔ آلیاژ فلزی آبکاری شده، جزئی از بدنهٔ ابزار می‌شود. این ابزارها می‌توانند مقاومت بیشتری در برابر نیروی اعمالی از حرکت چرخشی به هنگام سایش یا برش داشته باشند و تکه‌های الماس مدت بیشتری روی ابزار بمانند.

ابزارهای PCD دارای اجزایی از جنس الماس پلی‌کریستال هستند که تحت فشار و حرارت بسیار بالا، بر یک بستر کاربیدی چسبانده شده‌اند. سازندگان ابزار این اجزاء را خریداری کرده و با روش‌های آبکاری روی لبه‌های برش ابزار می‌نشانند.

ابزارهای این چنینی شبیه انواع کاربیدی کار می‌کنند با این تفاوت که سطح برش صاف و شیارهای مستقیمی برای خروج براده‌ها دارند.

روش جدیدتر ته نشینی بخار شیمیایی یا همان CVD است که در آن یک لایهٔ بسیار نازک (در حد چند آنگستروم) از الماس کریستالی به کمک ریز موج پلاسما (microwave plasma) مستقیماً روی سطح ابزار فلزی نشانده می‌شود. ابزارهای CVD نسبت به ابزارهای PCD که تنها سطوح صاف دارند، دارای انحنا و لبه برش‌های بیشتری هستند (شکل ۳). نکته‌ای که در مورد ابزارهای الماسه باید دانست آنست که اگرچه طول عمر این ابزارها بالاتر است ولی گرمای بیشتری تولید می‌کنند و ممکن است نیاز به سرد کردن داشته باشند.

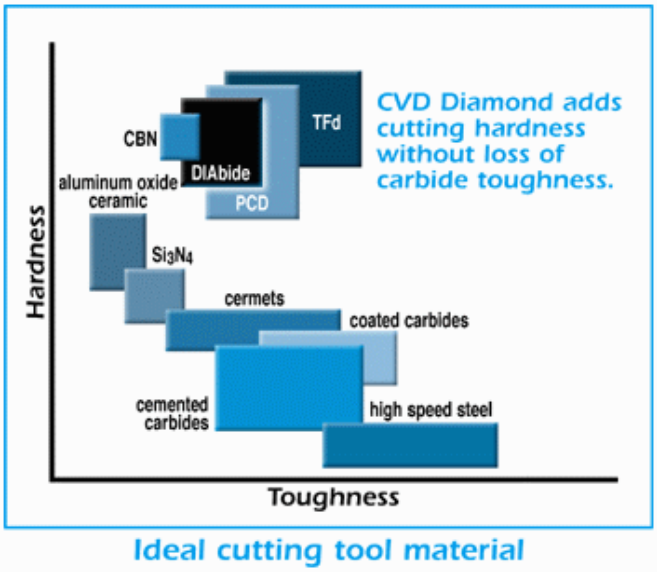
برخی سازندگان ابزار سیستم‌های هوا خنک یا آب خنک را توصیه می‌کنند ولی سرد کردن با آب ممکن است سبب نفوذ آب به الیاف شود یا بر سطح قطعه تاثیر منفی بگذارد. به این دلیل اکثر ابزارهای الماسه خشک کار نمی‌کنند ولی در زمان عمل باید دمای آنها کنترل شود تا در حد ممکن پایین بماند و نیز براده‌های برش جمع‌آوری گردد.

شکل ۳- انواع ابزارهای الماسه CVD

علاوه بر عمر طولانی‌تر، ابزارهای الماسه از پایداری ابعادی مناسبی برخوردارند و برخلاف نوک ابزارهای کاربیدی که در هنگام فرزکاری ساییده شده، قطر آنها کوچکتر می‌شود، نوک ابزارهای الماسه تنها در ابعاد میکروسکوپی ذرات الماس را از دست می‌دهد. به دلیل آنکه مکانیزم عملکرد ابزار الماسه بیشتر خرد کردن و سابیدن (grinding) است تا برش و قطع کردن، لبهٔ آن بیشتر از آنکه حلزونی باشد، اغلب صاف (شیار خنثی) و مستقیم است.

این مسئله می‌تواند به هنگام برش یا ماشینکاری کامپوزیت‌های الیاف چقرمهٔ آرامیدی، سبب ریش ریش شدن سطح برش گردد. برخی کاربران ابزارهای الماسه گزارش کرده‌اند که ابزارهای الماسه با دانه‌های درشت میل به پارگی و چاک دادن کامپوزیت دارند درحالیکه شیارهای ریز ابزارهای الماسه دانه‌ریز با پودرهای کربن (در مورد کامپوزیت‌های کربن) پر و مسدود می‌شود. بنابراین فرزکاری یا سوراخ‌کاری معمولاً به منظور افزایش سرعت با ابزار الماسه دانه درشت شروع می‌شود و برای رسیدن به سطوح صافتر با ابزار دانه‌ریز پایان پیدا می‌کند. با ابزارهای دانه‌ریز و برای رسیدن به سطح صاف نیاز به خنک‌کننده وجود دارد ولی ابزار دانه درشت می‌تواند خشک کار کند.

برای کاهش فرسایش ابزار به هنگام ماشین‌کاری با دستگاه‌های CNC، می‌توان با برنامه‌ریزی آن، محل تماس ابزار را تغییر داد و یا بصورت موجی بالا و پایین برد تا هم از تولید گرمای بیشتر جلوگیری شود و هم عمر ابزار بیشتر گردد. در شکل ٤، سختی انواع ابزارها با هم مقایسه شده است.



شکل ٤– مقایسه سختی انواع ابزارها (DIAbide یک نام تجاری برای ابزار الماسه CVD است)

از جمله سایر سازندگان ابزارهای الماسه می‌توان به شرکت کانادایی Dimond Production، شرکت انگلیسی Granden Diamond Products، شرکت فرانسوی Diamix و شرکت کانادایی Diatrim Tools اشاره نمود.

در روش CVD ضخامت الماس نسبت به ابزار الماسهٔ PCD کمتر است و زودتر ساییده می‌شود ولی باز هم ۲۰ مرتبه از ابزار کاربیدی مقاومتر است و حسن بزرگ آن این است که تمامی زوایا را می‌توان پوشش الماسه داد.

جت آب (water jet)

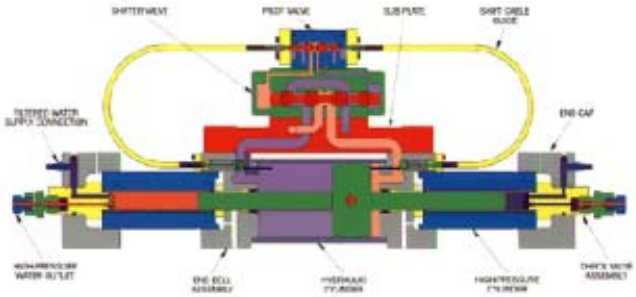
تمام روش‌هایی که تاکنون تشریح شدند به دلیل اصطکاک، گرمای زیادی تولید می‌کردند که می‌تواند سبب تخریب کامپوزیت شود. نقطهٔ مقابل این روش‌ها، جت آب است که هیچ تنشی بر قطعه وارد نمی‌کند و حرارت نیز تولید نمی‌شود. این روش توسط شرکت آمریکایی Flow International ابداع شده است (شکل ۵).

شکل ۵– برش توسط جت آب

در این روش آب تا ۶۰,۰۰۰ psi فشرده می‌شود که این کار به کمک پمپ‌های تشدید کننده (Intensifier pump) انجام می‌شود. پمپ‌های مستقیم پمپ‌هایی سه جزئی هستند که نیروی خود را مستقیماً از یک موتور الکتریکی می‌گیرند (شکل ۶) و فشاری که ایجاد می‌کنند ۱۰ تا ۲۵٪ کمتر از نوع دوم است (۲۰,۰۰۰ تا ۵۰,۰۰۰ برای پمپ‌های مستقیم و ۴۰,۰۰۰ تا ۶۰,۰۰۰ psi برای پمپ‌های تشدید کننده).

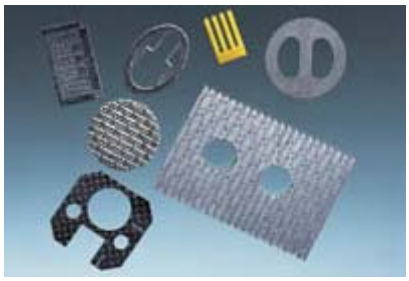
در پمپ‌های تشدید کننده (شکل ۷) دو مدار عبور آب وجود دارد یکی برای آب برش دهنده و دیگری سیستم هیدرولیک: سیستم هیدرولیک با فشار ۳۰۰۰ psi پمپ هیدرولیک، فشار آب را با یک مکانیزم سیلندر– پیستون به ۶۰,۰۰۰ می‌رساند.

شکل ۶– پمپ مستقیم سیستم جت آب



شکل ۷– پمپ تشدید کننده سیستم جت آب

آب فشرده شده از یک منفذ بسیار کوچک از جنس یاقوت یا الماس با سرعت ۹۰۰ m/sec و در فشار تقریباً اتمسفر خارج می‌شود. به کمک خلاء حاصل از عبور جریان، پودر سنگ مخصوص را به آب اضافه می‌کنند تا خاصیت ساینده‌گی پیدا کند. به دلیل آنکه آب خروجی در فشار کم خارج می‌شود، نیروی زیادی برای نگهداشتن هد خروجی لازم نیست. درحالیکه آب به تنهایی می‌توانست سبب جدایی لایه‌ها شود، آب به همراه پودر سنگ، اینگونه نیست. به این روش برای ایجاد سوراخی در یک پنل کامپوزیت الیاف کربن به ضخامت ۱۳ mm کمتر از ۱ ثانیه زمان لازم است و هیچ حرارتی نیز تولید نمی‌شود. چند نمونه از قطعات کامپوزیتی ماشینکاری شده با جت آب در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸– ماشین‌کاری‌های انجام شده توسط جت آب

روش‌های غیرساینده

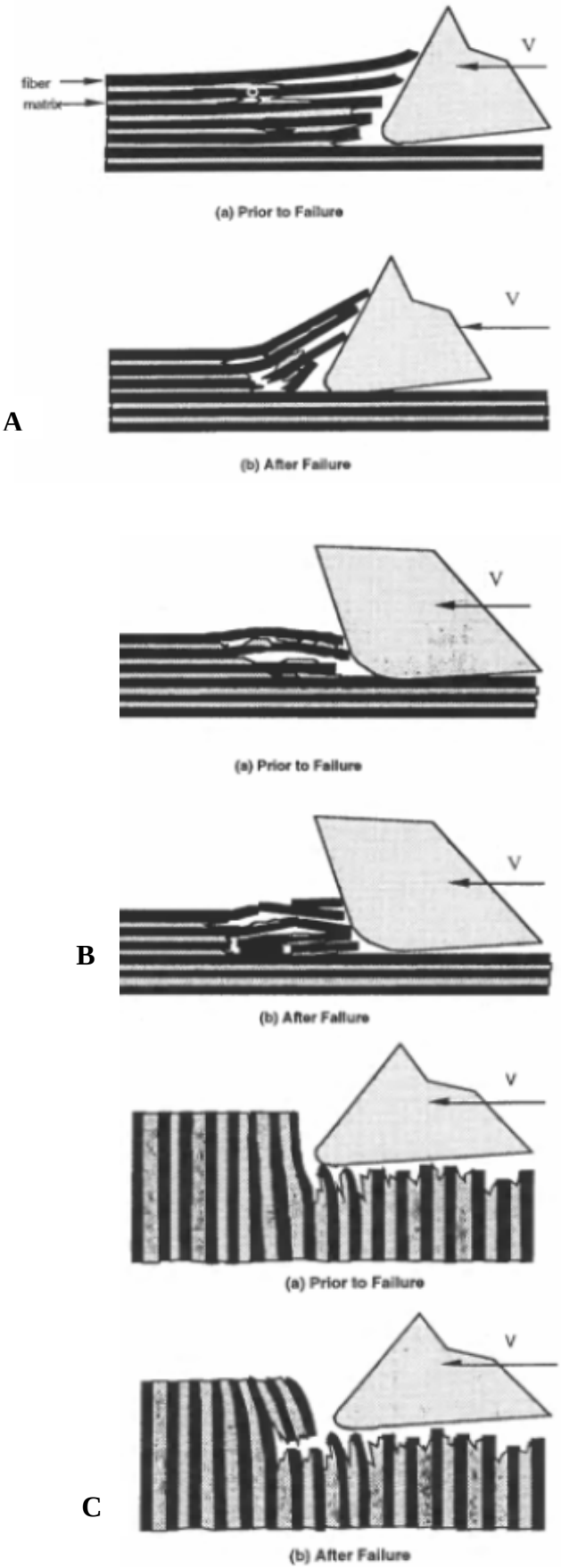
از روش‌های غیرساینده می‌توان به لیزر، اسپارک یا تخلیه الکتریکی (EDM)، پرتو یون و برش میکروویو اشاره نمود. برش لیزر معمولاً توسط لیزرهای CO_2 یا YAG (yttrium aluminum garnet) و از طریق افزایش دمای ماده تا تخریب یا ذوب انجام می‌شود. این مکانیزم در کامپوزیت‌های الیاف کربن با مشکل مواجه است و در کامپوزیت‌های آرامیدی ممکن است منجر به آزاد شدن گازهای سمی گردد. اما از طرف دیگر، اتلاف مواد به دلیل باریکی ناحیه برش بسیار کم است و به دلیل عدم اعمال نیرو، نیاز به هیچگونه ابزار و چفت و بستی برای نگهداری قطعه نیست.

روش EDM نیاز به سطح‌کاری با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰۰ Ohm.cm دارد (یعنی رسانا باشد) که در نتیجه برای کامپوزیت‌های الیاف شیشه قابل استفاده نیست. در این روش جریان الکتریکی به حرارت تبدیل شده، ماده را ذوب و تخریب می‌کند. این روش هنوز در حال توسعه است.

برش توسط سیستم‌های پرتو یون، پرتو الکترون و میکروویو تنها برای ورق‌های نازک استفاده می‌شود و نمی‌توان آنها را برای سطوح منفی (Contoured) که برای رسیدن به تلورانس‌های دقیق ماشین‌کاری می‌شوند، بکار گرفت.

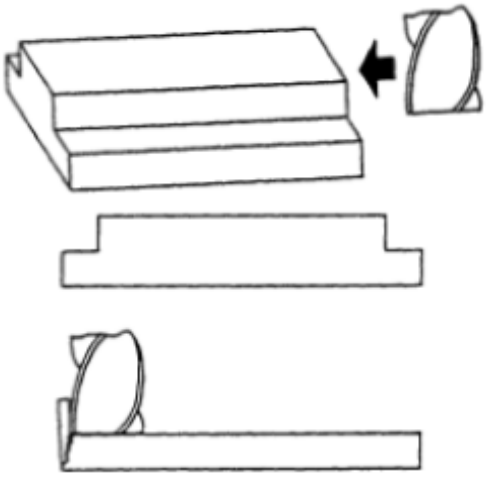
در پایان مطالبی درمورد ماشینکاری کامپوزیت‌ها نکته‌وار اشاره می‌شود:

- سرعت برش در تراشکاری کامپوزیت‌ها از ۱۲۰ تا m/min ٤۳۰ و خوراک دهی از ۰,۰٦ تا mm ۰,۳ گزارش شده است. تفاوت در نتایج ارائه شده را می‌توان ناشی از تفاوت در خواص مواد، آرایش و درصد الیاف، دمای کارکرد و متغیرهای مشابه دانست. در فرزکاری توصیه می‌شود خوراک در حد mm/rev ۰,۰۵ باشد. در این حال m/min ۲۷٤، شروع مناسبی برای سرعت برداشتن یک شیار کامل است.
- عمر ابزار PCD نسبت به نوع کاربیدی، ۱٦ تا ۵۰۰ برابر گزارش شده است. و کلاً عمر ابزار الماسه با دانه‌های درشت بیشتر از انواع دارای الماس دانه ریز گزارش شده است.
- تراشکاری چند لایه‌های ساخته شده از نمد شیشه، به دلیل مقاومت کمتر الیاف در جهت عمود بر ابزار، آسانتر از انواع دارای پارچه ۰/۹۰ است.
- به هنگام تراشکاری با میزان کم خوراک دهی، حرارت ایجاد شده، به نسبت مساوی توسط ابزار و تراشه جذب می‌شود. با افزایش نرخ براده برداری (خوراک دهی)، تراشه‌ها حرارت بیشتری را از محل دور می‌کنند در حالیکه در سرعت کم خوراک دهی، انتقال حرارت در ابزار نقش مهم‌تری بازی می‌کند. از آنجاییکه تراشه‌ها، مقادیر زیادی از حرارت را خارج می‌کنند، دمای بالا تنها در مدت کوتاهی بر ابزار تاثیر می‌گذارد و ابزار تنها می‌تواند بصورت موضعی تخریب شود.
- به هنگام تراشکاری لوله‌های کامپوزیتی، تراشه‌های کامپوزیت‌های الیاف کربن در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف شیشه، حرارت بیشتری را انتقال می‌دهند. عمق تخریب بیشتر در این کامپوزیت‌ها ناشی از هدایت حرارتی کربن است.
- کیفیت سطح قطعهٔ تراشکاری شده، مرتبط با نوع و آرایش الیاف، میزان سایش ابزار و دمای موضع تراشکاری است.
- برداشتن از قطعه به هنگام فرزکاری کامپوزیت‌ها، زنجیره‌ای از مکانیزم‌های شکست در مواد است و به آرایش الیاف و نیز زاویه ابزار برش با الیاف وابسته است. به عنوان مثال در فرزکاری کامپوزیت UD الیاف کربن، در صورت برش (cut) در جهت الیاف، شکست از طریق دو مکانیزم جدایی لایه‌ها یا delamination (در حالت زاویه مثبت تیغه) و کمانش یا Buckling (زوایه منفی یا عمود) اتفاق می‌افتد. در حالیکه اگر در جهت عمود بر الیاف فرزکاری انجام شود، شکست از طریق مکانیزم خمش یا bending اتفاق می‌افتد (شکل ۹).
- به منظور دستیابی به یک سطح خوب در فرزکاری، ابتدا گوشه‌ها را بردارید و بعد داخل را فرزکاری کنید (شکل ۱۰).

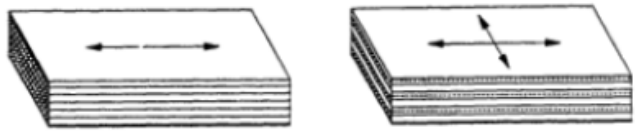


شکل ۹– مکانیزم‌های مختلف شکست در کامپوزیت تک جهته کربن؛ A: جدایی لایه‌ها B: کمانش و C:خمش

- در فرزکاری ورق‌های چند لایه کامپوزیت، فرزکاری می‌تواند موازی یا عمود بر الیاف انجام شود (شکل ۱۱).

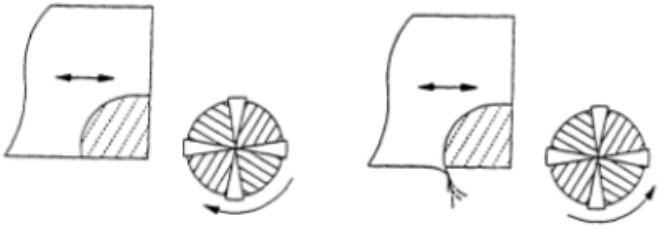


شکل ۱۰ – برداشتن گوشه‌ها در ابتدای فرزکاری



شکل ۱۱ – فرزکاری چندلایه‌های کامپوزیتی موازی یا عمود بر الیاف.

- شکل ۱۲ نشان می‌دهد که استثنائاً برش صعودی (climbing cut) در حذف پلیسه‌ها مفید است. یعنی به جای حرکت در جهت الیاف لبه، عمود بر آن فرز را حرکت می‌دهیم. این روش، برش را با مکانیزم قطع (chopping cut) انجام می‌دهد، درحالیکه چرخش در جهت مخالف، برش با کشش (pulling cut) همراه می‌شود.



شکل ۱۲ – برش صعودی جدایی الیاف را کاهش می‌دهد.

مراجع:

1. **Abrasive machining methods for composites**, High Performance Composites, November 2004, pp32-37.
2. **Machining of Ceramics and Composites,** S. Jahanmir et al, Marcel Dekker, 1999.
3. http://www.sp3inc.com/
4. http://www.flowcorp.com/