سال ۲۸، شماره ۱۲۵، صفحات ۳۸-۴۴، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

بررسی و مطالعه فاکتورهای آسیب در سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پلیمری

محمد خوران[۱ و *]، حسین امیرآبادی[۲]، بهمن آذرهوشنگ[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

[۲] دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

[۳] استاد دانشگاه فورت وانگن، فیلینگن- اشونینگن، آلمان

*مسئول مکاتبات: mokhoran@gmail.com

◄ چکیده

امروزه کامپوزیت‌ها به دلیل مزایایی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا نسبت به خوردگی و خستگی، عدم رسانایی الکتریکی، وجود روش‌های ساخت متنوع و امکان تولید اشکال پیچیده جایگاه ویژه‌ای در صنعت یافته‌اند. ماشینکاری این مواد به دلیل ذات ناهمسانگرد و غیر همگن و نیز وجود ذرات استحکام دهنده که موجب خوردگی ابزار می‌شود، سخت است. حین ماشینکاری این مواد عیوبی مانند تورق، برش نخوردن الیاف، شکست ماتریس، پلیسه، بیرون کشیده شدن الیاف، سوختگی اطراف ناحیه ماشینکاری و ... بوجود می‌آید. در بین فرآیندهای ماشینکاری، سنگ‌زنی دارای شرایط متفاوتی بوده و در صورت انتخاب صحیح پارامترهای ورودی فرآیند، عیوب حاصل از سنگ‌زنی در مقایسه با دیگر فرآیندهای ماشینکاری کمتر است. در این مقاله سنگ‌زنی کامپوزیت مورد بررسی و کنکاش قرار خواهد گرفت و جایگاه این فرآیند و معایب آن با دیگر فرآیندها مقایسه می‌شود. پارامترهای تأثیرگذار، مزایا و معایب و موقعیت‌های بکارگیری سنگ‌زنی آورده خواهد شد.

◄ واژگان کلیدی

سنگ‌زنی
کامپوزیت
تورق
الیاف برش نخورده
ماشینکاری

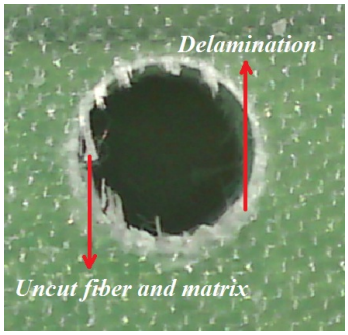
◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۲۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

۱ کامپوزیت

کامپوزیت یا ماده مرکب به معنی ماده تشکیل شده از دو یا چند ماده یا قسمت مختلف است. مواد مرکب، از موادی به فرم بافت، الیاف که توسط یك زمینه (ماتریس) یا رزین (چسب) به یکدیگر متصل شده‌اند، ساخته می‌شوند. مواد کامپوزیتی به صورت ذاتی در ابعاد ماکروسکوپی ناهمسانگرد[۱] است. کامپوزیت‌ها دارای مزایای چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا نسبت به خوردگی، وجود روش‌های مختلف ساخت، امکان تولید اشکال پیچیده و متنوع هستند. مواد مرکب بر دو اساس شکل ماده تقویت کننده و چگونگی توزیع یا قرارگرفتن آن‌ها در زمینه پلیمری تقسیم بندی می‌شود.

کامپوزیت‌های پلیمری بسته به نوع ماتریس آن روش‌های تولید مختلفی دارند. با اینکه کامپوزیت‌ها نزدیک به شکل نهایی تولید می‌شوند ولی معمولاً نیاز به روش‌های سنتی چون تراشکاری، سوراخکاری و یا روش‌های غیر سنتی مانند لیزر، واترجت و ... برای برش به اندازه مد نظر یا ایجاد سوراخ برای اتصالات مکانیکی دارند. خوران و همکاران [۱] پدیده تورق و الیاف برش نخورده در سوراخکاری پنل‌های ساندویچی را مورد مطالعه قرار دادند. همانطوری که در شکل ۱ دیده می‌شود، به جدا شدن لایه‌ها از یکدیگر تورق گفته می‌شود. او در پژوهشی دیگر با تغییر در نوع کامپوزیت (کامپوزیت سه بعدی پارابیم) فاکتورهای آسیب را مورد مطالعه قرار داد و مشخص نمود این کامپوزیت‌ها با توجه به ذات هندسی خود، دچار تورق نخواهند شد [۲]. وقتی هدف از ماشینکاری کامپوزیت، اندازه‌سازی[۲] و برش به اندازه مدنظر باشد (نسبت به سوراخکاری)، عیب‌های مختلفی پدیدار می‌شود.



شکل ۱: مکانیزم‌ها و نواحی مختلف تورق در سوراخکاری کامپوزیت ساندویچی [۱]

۲ سنگ‌زنی

سنگ‌زنی فرآیندی است که در آن از ذرات ساینده به عنوان لبه‌های برش جهت براده برداری استفاده می‌شود. ابزار سنگ‌زنی (چرخ سنگ) معمولاً از سه بخش تشکیل شده است. دانه‌های ساینده که وظیفه براده برداری، چسب که نگهدارنده این ذرات ساینده و وظیفه شکل‌دهی به چرخ سنگ و نهایتا خلل و فرج که وظیفه انتقال براده و مایع خنک کننده را دارند. سنگ‌زنی به عنوان فرآیند نهایی ماشینکاریِ قطعاتی که نیاز به سطوح صاف و تلرانس‌های بسته دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند دارای اهمیت به‌سزایی بوده و ۲۰

[1] anisotropic [2] Sizing

تا ۲۵ درصد فرآیندهای ماشینکاری در کشورهای صنعتی را به خود اختصاص داده است [۳].

سنگ‌زنی کامپوزیت‌ها دارای مزایایی چون عدم تشکیل پلیسه، عدم ایجاد اثر ماشینکاری خاص بر روی سطح قطعه نهایی، ایجاد کیفیت سطح و دقت ابعادی بالا است. در عین وجود مزایایی بالقوه فرآیند، معمولاً سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پلیمری دارای مخاطرات و مشکلاتی است که باید به تفصیل بررسی شود.

۱.۲ مشکلات سنگ‌زنی کامپوزیت

در سنگ‌زنی نه تنها شکل، اندازه و توزیع لبه برنده بلکه شرایط خلل و فرج سطح نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند. از با اهمیت‌ترین مشکلاتی که هنگام سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پلیمری ایجاد می‌گردد بحث بارگیری چرخ سنگ است.

بارگیری سنگ شامل چسبیدن ذره به دانه و پر شدن فضاهای خالی سنگ است. چسبیدن ذره به دانه همان تشکیل لبه انباشته[1] می‌باشد. بارگیری چرخ سنگ با سه سازوکار زیر اتفاق می‌افتد که عبارتند از [۴]:

- واکنش شیمیایی بین دانه‌های فعال و براده
- انباشت مکانیکی براده در فضاهای خالی مجاور یک دانه فعال
- سازوکار فشار و جوش بر روی لبه‌های برشی و دانه در فازهای تشکیل براده

بدلیل ضریب انبساط حرارتی بالاتر کامپوزیت‌های پلیمری (نسبت به فلزات)، هنگام سنگ‌زنی این مواد صدا و ارتعاشات بیشتر، عیوب حرارتی بالاتر و بارگیری بیشتر سطح چرخ سنگ را شاهد خواهیم بود، (نویسنده مقاله: زیرا افزایش اندازه قطعه‌کار به سمت چرخ سنگ اتفاق می‌افتد) [۵].

کامپوزیت به علت استحکام پایین‌تری که نسبت به فلزات دارد، دچار تغییر شکل بالاتری گشته و معمولاً با فرورفتگی سطح قطعه کار در حین فرآیند سنگ‌زنی همراه خواهد بود.

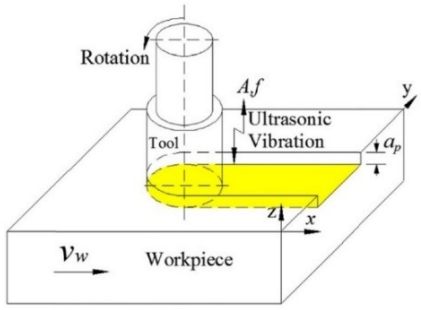
در مجموع عیوبی که حین سنگ‌زنی کامپوزیت و پلیمر وجود دارد نسبت به فلزات بیشتر است.

۳ مطالعات انجام گرفته در زمینه سنگ‌زنی کامپوزیت

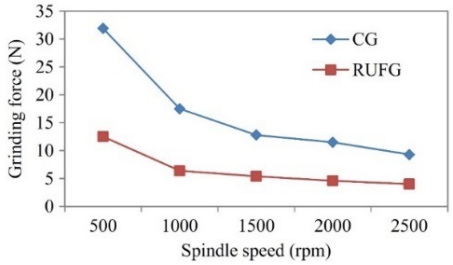
پژوهش‌های بسیار کمی به مطالعه سنگ‌زنی کامپوزیت‌ها پرداخته‌اند و این تعداد پژوهش اندک نیز مربوط به کامپوزیت‌های ورقه‌ای بوده است. قطعاتی که نیاز به دقت و هندسه ابعادی دقیق‌تر، کیفیت سطح بالاتر و ... هستند نیاز به ماشینکاری و به طور خاص سنگ‌زنی دارند. به طور مثال میله‌های چاپ پرینتر باید دارای کیفیت سطح و دقت ابعادی بسیار بالایی باشند.

لیو و همکارن [۶] اثر تلفیق سنگ‌زنی سطح دورانی با ارتعاشات التراسونیک (RUFG)[2] در سنگ‌زنی CFRP[3] را مورد مطالعه قرار داد و با سنگ‌زنی معمولی (CG)[4] مقایسه نمود. همانطوری که در شکل ۲ دیده می‌شود ارتعاشات به ابزار اعمال شده است.

ارتعاشات التراسونیک دارای مزایایی چون تغییر سازوکار براده برداری، کاهش نیروی برش و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار، کاهش دمای ماشینکاری است و عمر ابزار، دقت و کیفیت سطح را بهبود می‌دهد. ظرفیت برش ابزار و نرخ براده برداری را افزایش می‌دهد. کاهش نیرو با افزایش سرعت برشی کاملا مشخص است (شکل ۳) زیرا (بر اساس نظر نویسنده مقاله) مساحت صفحه برش یا حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش می‌یابد (φ یا همان زاویه صفحه برش افزایش پیدا می‌کند)، از طرف دیگر بعلت افت مقاومت به برش ماده در منطقه‌ی HAZ[5] و تغییر رفتار پلاستیکی ماده در سرعت‌های برشی بالا، نیروی ماشین‌کاری کم شده است. از سوی دیگر در صورتی که پیشروی ثابت باشد با افزایش سرعت دورانی، بار براده کمتر شده در نتیجه نیرو کاسته می‌شود.

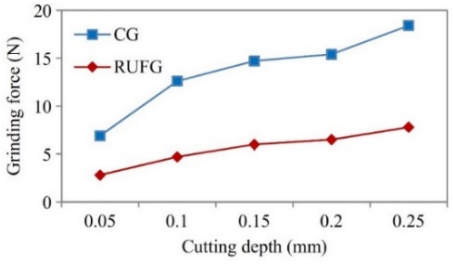


شکل ۲: شماتیک RUFG [۶]



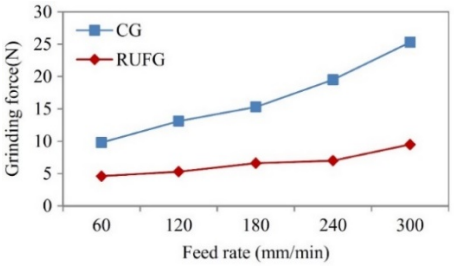
شکل ۳: رابطه بین نیروی سنگ‌زنی و سرعت دورانی [۶]

با افزایش پیشروی و عمق برش به علت افزایش بار براده، نیروی سنگ‌زنی افزایش می‌یابد (شکل ۴ و ۵). همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش عدد دانه، نیرو تقریبا ثابت است زیرا اگر عدد دانه افزایش یابد، اندازه ذره ساینده کاهش خواهد یافت، لذا تعداد دانه‌های فعال افزایش یافته و نیرو ثابت باقی خواهد ماند.

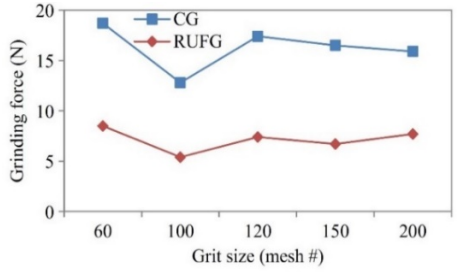


شکل ۴: رابطه بین نیروی سنگ‌زنی و عمق برش [۶]

[1]Built up edge [2]Rotary ultrasonic face grinding (RUFG) [3]Carbon fiber reinforced Plastic [4]Conventional Grinding [5]Heat Affected Zone



شکل ۵: رابطه بین نیروی سنگ‌زنی و پیشروی [۶]



شکل ۶: رابطه بین نیروی سنگ‌زنی و اندازه دانه [۶]

تمامی شکل‌ها اثبات نمود که سنگ‌زنی با ارتعاشات التراسونیک دارای نیروی کمتری نسبت به سنگ‌زنی معمولی است.

فرآیند RUFG توسط وانگ و همکاران در پژوهش‌های [۷] و [۸] بکار گرفته شد و تاثیر پارامترهای سنگ‌زنی و ابزار بر نیروی ماشینکاری، مورد بررسی قرار دادند. وانگ [۸] مشخص نمود که نیرو و گشتاور با افزایش اندازه دانه کاهش و زبری سطح افزایش می‌یابد. با افزایش تراکم ذرات، نیرو، زبری سطح و گشتاور افزایش می‌یابد.

چوکالینگام [۹] به بررسی اثر نوع جنس ذرات ساینده چرخ سنگ بر زبری سطح و نیروی سنگ‌زنی کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه پرداخت. او مشخص کرد چرخ سنگ آلومینیم اکساید دارای نیروی سنگ‌زنی کمتری نسبت به چرخ سنگ CBN[1] است. در حالی که چرخ سنگ CBN زبری سطح کمتری تولید نمود. او در پژوهشی دیگر قابلیت سنگ‌زنی ورقه‌های CFRP را مورد مطالعه قرار داد و اثر تغییر سرعت برشی، پیشروی و عمق برش بر نیروی سنگ‌زنی را مورد مطالعه قرار داد. وی علاوه بر نیرو اثر مایع خنک کننده را نیز بررسی نمود [۱۰]. نتایج نشان داد که استفاده از مایع خنک کننده، زبری سطح را کاهش خواهد داد. شکل ۷ (تصاویر میکروسکوپ الکترونی) نشان می‌دهد که برداشت ماده ماتریس زمینه، توسط فاز تشکیل براده بوده. در صورتی که الیاف شیشه توسط مکانیزم‌های برش، شکست و سایش براده برداری می‌شوند.

پارک و همکاران [۱۱] از سنگ زنی برای رسیدن به کیفیت سطح آینه‌ای کامپوزیت CFRP با رزین اپوکسی بهره گرفتند. سنگ چرخ الماس با چسب فلزی و درسینگ الکترولیتی حین فرآیند[2] از تجهیزات قابل ذکر آن‌ها بود. مشخص شد زبری سطح به شدت بستگی به جهت سنگ‌زنی دارد، کمترین زبری سطح در حالتی که جهت سنگ‌زنی دارای زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت الیاف بود اتفاق افتاد.

اسپارک اوت[3] نقش بسیار بالاتری در CFRP ها نسبت به فلزات دارد زیرا تغییر شکل‌های الاستیک آزاد شده در این مواد بسیار بیشتر از فلزات است. آن‌ها با انجام آزمون‌های تجربی مشخص کردند محدوده عدد مش مناسب برای رسیدن به زبری سطح مطلوب ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ است. به‌دلیل تغییر شکل‌های الاستیک رزین و الیاف و بازگشت سطح به جای اول پس از گذشت از منطقه سنگ‌زنی، در شرایط ماشینکاری مشابه، عدد زبری بدست آمده در این کامپوزیت‌ها همواره بیشتر از فلزات است (شکل ۸).

ساساهارا و همکاران [۱۲] اثر سنگ‌زنی سطحی و نیز اثر وجود مایع‌های خنک کننده در حالت پاشش خارجی و پاشش از درون ابزار(عبور مایع خنک کننده توسط منافذ خالی موجود در چرخ سنگ– شکل ۹) با سنگ‌زنی در حالت خشک را بررسی کردند. وی سطوح حاصل را در شرایط مساوی با فرزکاری مقایسه کرد. مواردی مانند پلیسه، بیرون کشیده شدن الیاف و تورق در فرزکاری وجود داشت که در سنگ‌زنی بوجود نداشت. نتایج مشخص کرد، در صورت استفاده از پاشش خنک‌کار از درون ابزار، بارگیری سنگ به شدت کاهش می‌یابد. با اندازه‌گیری آستانه فرسایش ابزار کاربیدی فرزکاری و بررسی سطح چرخ سنگ، سایش ابزار مورد بررسی و کارایی سنگ‌زنی در کاهش سایش ابزار مورد تایید قرار گرفت.

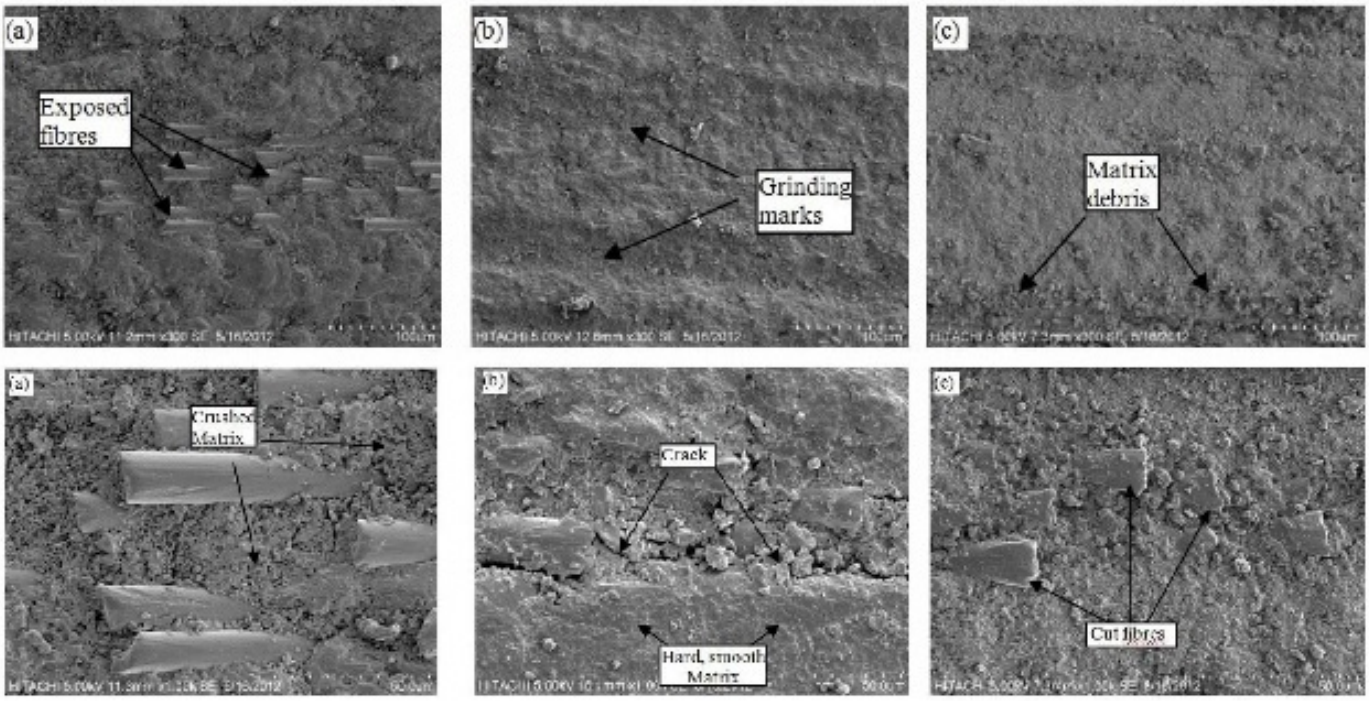
سنگ‌زنی حدود ۵۰ درصد، زبری سطح کمتری نسبت به فرزکاری ایجاد کرد و زاویه الیاف تاثیر زیادی بر کیفیت سطح حاصل(سنگ‌زنی) نداشت (شکل ۱۰). حرارت سنگ‌زنی توسط ترموکوپل سنجیده شد و همانطوری که در شکل ۱۱ مشخص است روش خنک کنندگی داخلی دارای قدرت بسیار بالای بوده به صورتی که دمای ماشینکاری همواره پایین‌تر از دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر بوده است. وی اثبات کرد که بارگیری چرخ سنگ منجر به افزایش نیروی ماشینکاری می‌شود(شکل ۱۲) و چرخ سنگی که دارای سیستم خنک کننده داخلی بود، دچار پدیده بارگیری چرخ سنگ نشد. همانطوری که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در حالت خشک، خلل و فرج سنگ، کاملا پر شده و سنگ کاملا بار گرفته است.

هو و زانگ [۱۳] قابلیت سنگ‌زنی کامپوزیت‌های CFRP که بصورت چند لایه در جهت‌های مختلف چیده شده بودند را با در نظر گرفتن شرایط سطح، شکل‌گیری براده، سازوکار برداشت ماده و نیروی سنگ‌زنی مورد مطالعه قرار دادند. شکل ۱۴ جهت گیری الیاف را بصورت شماتیک نسبت به چرخ سنگ نشان می‌دهد. مشخص شد که با افزایش عمق برش، نیروی سنگ‌زنی ویژه کامپوزیت چند جهته، بالاتر از کامپوزیت‌های یک جهته است، زیرا الیاف با زاویه‌های مختلف انسجام یافته و باعث استحکام یکدیگر می‌شوند.

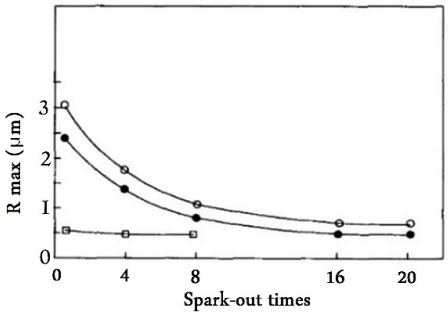
زبری سطح به شدت بستگی به جهت سنجش آن داشت ولی کامپوزیت چند جهته دارای بهترین کیفیت سطح و کامپوزیت تک جهته که دارای زاویه ۴۵– بود، بدترین زبری سطح را داشت (شکل ۱۵). برداه‌های ایجاد شده با شکل‌های مختلفی چون پودر، الیاف شکسته و تکه‌های شکسته کامپوزیت مشاهده شد.

آن‌ها در پژوهشی دیگر [۱۴] تاثیر جهت‌گیری الیاف و عمق سنگ‌زنی بر نیروی سنگ‌زنی و یکپارچگی سطح کامپوزیت‌های با الیاف کربن یک جهته و زمینه اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند.

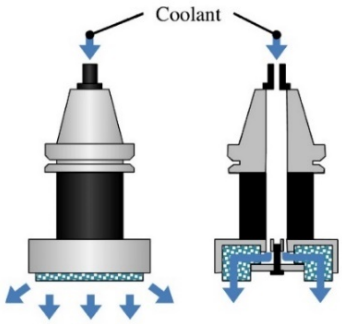
[1]Cubic Boron Nitride [2]Electrolytic in-process dressing (ELID) [3]spark-out



شکل ۷: سطر اول بزرگنمایی ۳۰۰ و سر دوم بزرگنمایی ۱۰۰۰ a: بدون مایع خنک کننده b: خنک کننده سینتیتیک c: خنک کننده امولسیون [۱۰]



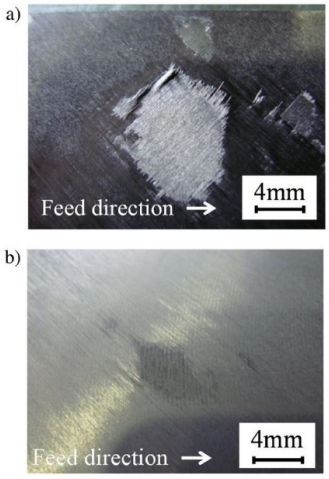
شکل ۸: نقش اسپارک اوت در بهبود زبری سطح [۱۱]



شکل ۹: سیستم خنک کننده داخلی [۱۲]

حداکثر نیرو در زاویه الیاف ۶۰ تا ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد و حداقل زبری سطح در ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه بوده زیرا سطح اره‌ای و عمق معیوب بالاتری ایجاد می‌گردد. مشخص شد که جهت‌گیری الیاف تاثیر زیادی بر خروجی دارد و عمق سنگ‌زنی تاثیر کمتری بر زبری سطح دارد.

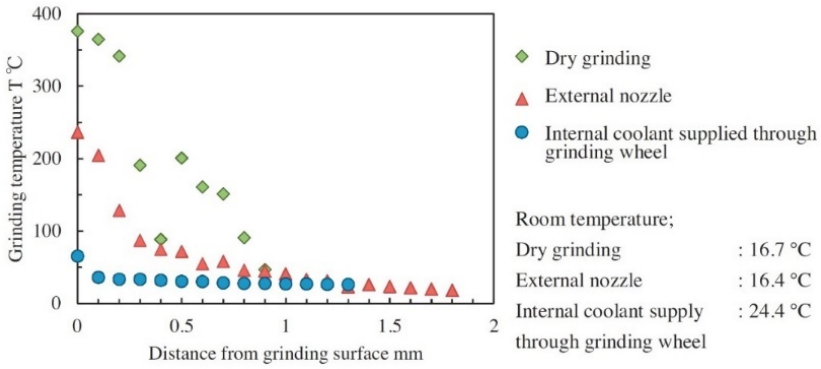
شکل ۱۶ زاویه الیاف و عکس میکروسکوپی سطح را نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات کیفیت سطح با تغییر در جهت گیری الیاف کاملا مشخص است.



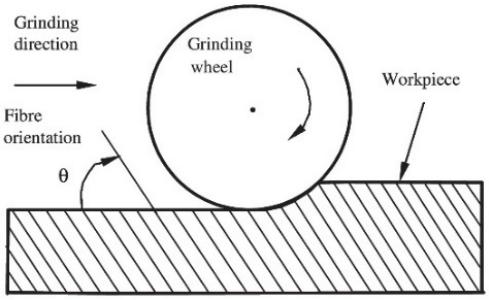
شکل ۱۰: سطح ماشینکاری شده. a) فرزکاری و b) سنگ‌زنی با سیستم خنک کننده داخلی [۱۲]

در فرآیند سنگ‌زنی به علت اندازه کوچک براده، نیروی سنگ‌زنی ویژه بطور نسبی بالا است و در نتیجه حرارت تولیدی به علت اصطکاک لغزشی دارای اهمیت است. استفاده از خنک‌کننده در سنگ‌زنی کامپوزیت‌ها به علت نگهداری آن زیر دمای کاری پلیمر زمینه ضروری می‌باشد [۱۵].

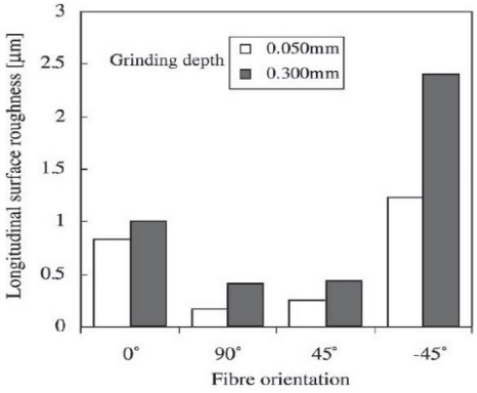
سو و همکاران [۱۶] از ابزار سنگ انگشتی CBN و الماس برای مطالعه خوردگی ابزار، یکپارچگی سطح قطعه‌کار و نیروی ماشین‌کاری در سنگ‌زنی کامپوزیت CFRP استفاده نمودند. آن‌ها پژوهش خود را به دو گروه خشن تراشی و پرداخت‌کاری تقسیم کردند. اثبات شد ابزار با اندازه دانه ۷۶ برای خشن‌تراشی مناسب نیست چون به سرعت دچار بارگیری می‌شود در صورتی که ابزار D76 برای پرداخت‌کاری بسیار مناسب است.



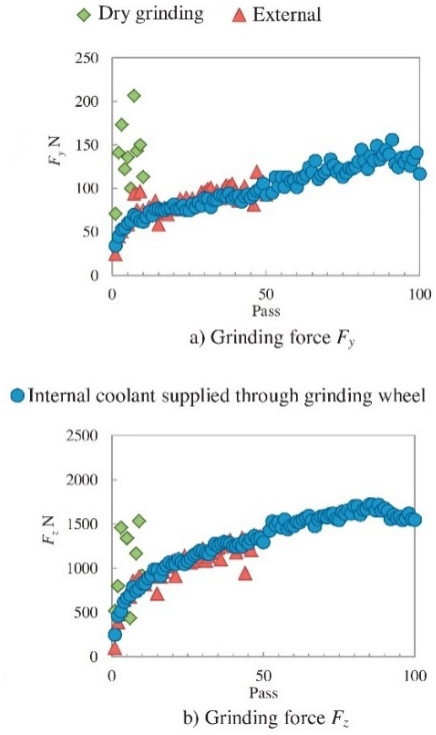
شکل ۱۱: حرارت اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در سنگ‌زنی CFRP [۱۲]



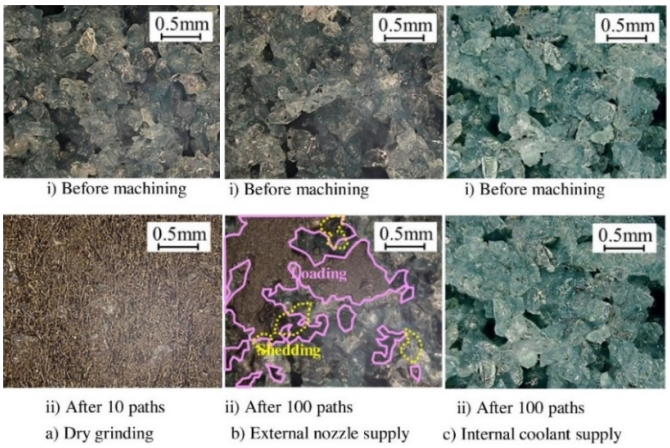
شکل ۱۴: شرایط جهت گیری الیاف [۱۳]



شکل ۱۵: اثر جهت گیری الیاف بر کیفیت سطح [۱۳]



شکل ۱۲: تاثیر نوع خنک کننده بر نیروی سنگ‌زنی [۱۲]

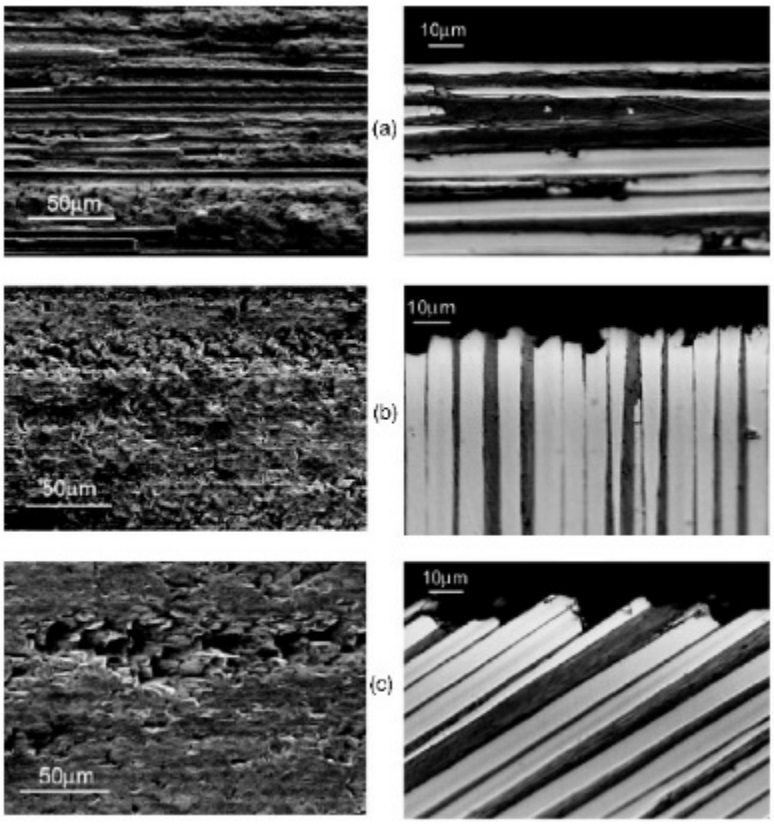


شکل ۱۳: توپوگرافی چرخ سنگ در حالت‌های سنگ‌زنی مختلف الف) خشک بعد از ۱۰ پاس ب) خنک کننده خارجی بعد از ۱۰۰ پاس ج) خنک کننده داخلی بعد از ۱۰۰ پاس [۱۲]

ابزار CBN دارای نرخ خوردگی بالاتری نسبت به ابزار الماس بود (شکل ۱۷) و این سایش بیشتر منجر به حرارت بیشتر در نتیجه ذوب ماتریس زمینه شده است. تورق قابل ذکری در هیچ کدام از قطعات سنگ‌زنی شده توسط هر دو ابزار دیده نشد. آن‌ها پیشنهاد دادند استفاده از ابزار التراسونیک (در جهت محور ابزار) منجر به کاهش زبری و بارگیری چرخ سنگ خواهد شد.

۴ نتیجه‌گیری

کاربرد سنگ‌زنی به عنوان یکی از فرآیندهای ماشینکاری در کامپوزیت‌ها با توجه به مزایایی چون عدم تشکیل پلیسه، عدم ایجاد اثر ماشینکاری خاص بر روی سطح قطعه نهایی، ایجاد کیفیت سطح و دقت ابعادی بالا که دارد مورد توجه پژوهشگران زیادی بوده است. مقالات متعددی در این زمینه منتشر



شکل ۱۶: تاثیر جهت گیری الیاف a : ۰ درجه، b : ۹۰ درجه، c : ۱۵۰ درجه [۱۴]

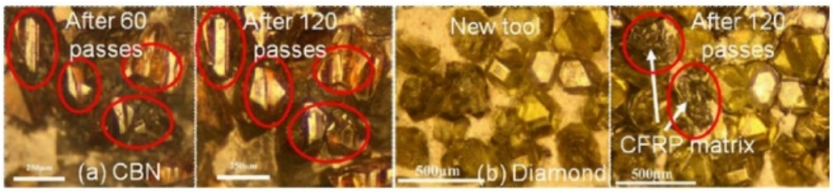


Fig. 5. Wear progression of; (a) B252, (b) D252 abrasives.

شکل ۱۷: سایش ابزار در تعداد پاس ۶۰ و ۱۲۰، a) ابزار CBN، b) ابزار الماس [۱۶]

شده که بیشتر مقالات بر روی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف رشته‌ای بوده و مشکلات موجود آن مورد بررسی قرار گرفته است. از محدودیت‌های فرآیند سنگ‌زنی کامپوزیت‌ها بارگیری چرخ سنگ است که نیاز به مطالعات دقیق‌تری در این حوزه وجود دارد.

از جمله عیوبی که در سنگ‌زنی کامپوزیت‌ها (بیشتر از فلزات) مشاهده می‌شود، فرو رفتن سطح کار، عیب‌های حرارتی، ارتعاش زیاد و بارگیری سنگ بوده، که به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی آن‌ها نسبت به فلزات است.

در عین عیوبی که ذکر شد مزایای بالای سنگ‌زنی کامپوزیت‌ها در مقایسه با دیگر فرآیندهای ماشینکاری مانند فرزکاری این نوید را خواهد داد که، سنگ‌زنی برای این مواد در آینده نزدیک جایگاه ویژه‌ای خواهد یافت.

مراجع

[1] Khoran, M, Ghabezi, P, Frahani, M, and Besharati, MK. Investigation of drilling composite sandwich structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12):1927–1936, 2015.

[2] Khoran, M. and seyedkashi, S. m. H. Investigation and optimization of damage factor in drilling of parabeam three-dimensional composites. *Modares Mechanical Engineering*, 16(51-59), 2016 (in persian).

[3] Sadeghi, M. H. Metal cutting principles. *Tehran: Abed*, (367), 2009 (in persian).

[4] Lauer-Schmaltz, H and König, W. Phenomenon of wheel loading mechanisms in grinding. *CIRP Annals*, 29(1):201–206, 1980.

[5] El Wakil, SD. Grinding processes for polymer matrix composites. in *Machining Technology for Composite Materials*, pp. 65–74. Elsevier, 2012.

[6] Liu, Shuliang, Chen, Tao, and Wu, Chaoqun. Rotary ultrasonic face grinding of carbon fiber reinforced plastic (cfrp): a study on cutting force model. *The International Journal*

of Advanced Manufacturing Technology, 89(1-4):847–856, 2017.

[7] Ning, Fuda, Cong, Weilong, Wang, Hui, Hu, Yingbin, Hu, Zhonglue, and Pei, Zhijian. Surface grinding of cfrp composites with rotary ultrasonic machining: a mechanistic model on cutting force in the feed direction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1-4):1217–1229, 2017.

[8] Wang, Hui, Ning, Fuda, Hu, Yingbin, Fernando, PKSC, Pei, Zhijian J, and Cong, Weilong. Surface grinding of carbon fiber–reinforced plastic composites using rotary ultrasonic machining: effects of tool variables. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(9):1687814016670284, 2016.

[9] Chockalingam, Palanisamy and Kuang, Kok Chee. Effects of abrasive types on grinding of chopped strand mat glass fiber-reinforced polymer composite laminates. *Machining Science and Technology*, 19(2):313–324, 2015.

[10] Chockalingam, P and Kuang, Kok Chee. Grindability study on the glass fibre reinforced plastic composite laminates. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(11):429–434, 2013.

[11] Park, Kyu Ycol, Nakagawa, Takco, et al. Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics. *Journal of materials processing technology*, 52(2-4):386–398, 1995.

[12] Sasahara, Hiroyuki, Kikuma, Tomoko, Koyasu, Rei, and Yao, Yasuhiro. Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (cfrp) with an internal coolant supplied through grinding wheel. *Precision Engineering*, 38(4):775–782, 2014.

[13] Hu, NS and Zhang, LC. A study on the grindability of multidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3):152–156, 2003.

[14] Hu, NS and Zhang, LC. Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of materials processing technology*, 152(3):333–338, 2004.

[15] Sheikh-Ahmad, Jamal Y. *Machining of polymer composites*, vol. 387355391. Springer, 2009.

[16] Soo, Sein Leung, Shyha, Islam S, Barnett, Tom, Aspinwall, David K, and Sim, Wei-Ming. Grinding performance and workpiece integrity when superabrasive edge routing carbon fibre reinforced plastic (cfrp) composites. *CIRP annals*, 61(1):295–298, 2012.