مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد ۱۴۰۲، دوره ۱۰، شماره ۳، ص‌ص. ۱- ۸

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/IJME.2023.422082.1867

بهبود دقت ابعادی سوراخ‌های ایجادشده در کامپوزیت CFRP با کمک ارتعاشات آلتراسونیک

محمد براهنی*، وحید جندقی شاهی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: mbaraheni@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۶ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

سوراخ‌کاری

آلتراسونیک

کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن

ابزار هسته‌دار الماسه

تلرانس ابعادی

چکیده

کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن دارای کاربردهای صنعتی متعددی می‌باشند که به علت خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب آن‌ها می‌باشد. سوراخ‌کاری از جمله روش‌های رایج برای ایجاد اتصال بین سازه‌های از جنس مواد تقویت‌شده با الیاف می‌باشد. فرآیند سوراخ‌کاری چرخشی آلتراسونیک از روش‌های نوین در ماشینکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تلرانس دقیق ابعادی از جمله موارد مهم در ماشینکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن می‌باشد. از این رو در سال‌های اخیر از ابزارهای جدید مانند ابزار الماسه هسته‌دار با توجه به کاهش نیرو و انجام همزمان عملیات سوراخ‌کاری و سنگ‌زنی داخل سوراخ، در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، استفاده می‌کنند. در این پژوهش، به بررسی دقت ابعادی در فرآیند سوراخ‌کاری به کمک امواج آلتراسونیک در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن پرداخته شده است. نتایج، بیانگر کاهش مؤثر نیروی محوری در سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد تلرانس استوانه‌ای بودن و دایره‌ای بودن در صورت استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. با توجه به آزمایشات انجام شده مشاهده گردید افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار موجب بهبود کیفیت سوراخ را بهبود می‌بخشد.

Enhancing dimensional accuracy of the produced holes in CFRP by ultrasonic vibration assistance

Mohammad Baraheni*, Vahid Jandaghi Shahi

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* Corresponding Author's Email: mbaraheni@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 23 October 2023

Accepted: 7 November 2023

Keywords:

Drilling

Ultrasonic

Carbon Fibers Reinforced Composite

Cored Diamond Tool

Dimensional Tolerance

Abstract

Carbon fiber reinforced composites have many industrial applications due to their suitable mechanical and physical properties. Drilling is one of the common methods for creating connections between fiber-reinforced structures. Rotary ultrasonic drilling process is one of the new methods in machining fiber-reinforced composites, which has been highly regarded in recent years. Exact dimensional tolerance is one of the important issues in machining of carbon fiber reinforced composites. Therefore, in recent years, new tools such as cored diamond tools are used in drilling fiber-reinforced composites, considering force reduction and simultaneous drilling and grinding inside the hole. In this research, the dimensional accuracy in the drilling process using ultrasonic waves in carbon fibers reinforced composites has been investigated. The results indicate the effective axial force reduction in vibration drilling compared to traditional drilling. Besides, the results show that the cylindrical and roundness tolerance have been improved significantly while using ultrasonic vibrations. According to the examinations, it was observed that the tool rotational speed increasing and feed rate decreasing improve quality of the hole.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Baraheni M, Janfaghi Shahi V. Enhancing dimensional accuracy of the produced holes in CFRP by ultrasonic vibration assistance. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 May 22;10(3):1-8. doi: 10.22034/IJME.2023.422082.1867 [In Persian]

۱– مقدمه

امروزه با توجه به گسترش کاربرد قطعات کامپوزیتی در صنایع مختلف نظیر صنایع هوافضا، خودروسازی و غیره، ماشینکاری کامپوزیت‌ها اهمیت فراوانی پیدا کرده است. قطعات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن با توجه به نسبت بالای استحکام به وزن، نسبت بالای مدول کششی به وزن و استحکام بالای خستگی امروزه در صنایع مختلف بسیار حائز اهمیت می‌باشند. سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی یکی از فرآیندهای مهم و چالش برانگیز در ساخت سازه‌های صنعتی می‌باشد. دلیل آن، ضریب هدایت حرارتی پایین و استحکام بالای این مواد می‌باشد. طیف گسترده‌ای از ابزارهای مختلف برای ماشینکاری کامپوزیت‌ها در دسترس است. ابزار کاربید سمانته بعلت ساینده‌گی بالای کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته برای کارایی بهتر و طول عمر بیشتر برای ماشینکاری کامپوزیت‌ها از پوشش‌های مختلف در این ابزارها استفاده می‌گردد. همچنین به علت پایین بودن سختی قطعات کامپوزیتی نسبت به فلزات و سایش زیاد ابزار در کامپوزیت‌ها ابزارهای سرامیکی برای ماشینکاری کامپوریت‌ها مناسب می‌باشند. ابزارهای الماسه چند کریستالی و نیترید بور مکعبی چند کریستالی مانند سرامیک‌ها به علت سختی بالا، اتلاف گرما و مقاومت سایش عالی ابزارهای مناسبی برای ماشینکاری کامپوزیت‌ها می‌باشند، ولی قیمت این ابزارها بالا بوده و اکثراً مقرون به صرفه نمی‌باشند.

از طرفی قابلیت ماشینکاری پایین، متفاوت بودن خواص مکانیکی در جهات متفاوت و همچنین استحکام بین لایه‌ای کمتر باعث افزایش تمایل کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن به ایجاد لایه‌لایه شدگی در آن‌ها شده است. دو مشکل اساسی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن، سایش ابزار و لایه‌لایه شدگی می‌باشد. بروز این دو عیب در کامپوزیت‌ها، باعث کاهش استحکام خستگی و ایجاد مشکل در مونتاژ آن‌ها می‌شود.

به منظور بهبود عملکرد سوراخ‌کاری بدون لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت، روش سوراخ‌کاری با ابزار هسته‌دار که با چرخش ابزار، ماده قطعه‌ی‌کار توسط عمل سنگ‌زنی ذرات برنده، برداشته می‌شود.

مبنای فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی مانند سوراخ‌کاری معمولی می‌باشد با این تفاوت که برای بهبود شرایط ماشینکاری، ارتعاشات طولی نیز به حرکت مته اضافه می‌گردد. به منظور ایجاد ارتعاش در ابزار، باید آن را به سیستم ارتعاشی متصل نمود. بنابراین ابزار به هورن و سپس هورن به ترانسدیوسر متصل می‌گردد. وظیفه ترانسدیوسر، تبدیل امواج الکتریکی به ارتعاش مکانیکی می‌باشد. هندسه هورن، بستگی به کاربرد و فرکانس مورد نظر دارد. بنابراین برای هر فرایندی که از ارتعاش آلتراسونیک استفاده می‌شود باید هورن متناسب با آن فرایند طراحی و ساخته شود.

محققان، پژوهش‌های متعددی بر روی فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی انجام داده‌اند. جاو و همکارانش سوراخ‌کاری ارتعاشی قطعاتی از جنس آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش لغزش سر مته و کیفیت سطح سوراخ در سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی بهبود یافت اما عمر مته در سوراخ‌کاری ارتعاشی کمتر شده است [۱]. چنگ و همکارانش نیروی محوری را در سوراخ‌کاری ارتعاشی آلومینیوم مدل‌سازی کرده و مدلی برای ارتفاع پلیسه در سوراخ‌کاری ارائه دادند. بر اساس این پژوهش با استفاده صحیح از ارتعاشات اولتراسونیک می توان ارتفاع پلیسه را کاهش داد [۲]. نوجبایر و استول بصورت تجربی نشان دادند که در سوراخ‌کاری ارتعاشی آلیاژهای آلومینیوم، عمر ابزار نسبت به روش معمولی بهبود می‌یابد. در این پژوهش دو ابزار ارتعاشی با دو قطر متفاوت ساخته شد. مکانیزم چرخشی، برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری آلتراسونیک، طراحی و ساخته شده و پارامترهایی از قبیل نیروی محوری و نوع براده بررسی و با فرآیند سوراخ‌کاری معمولی مقایسه گردید [۳].

لیو و همکارانش، به بررسی و مقایسه انواع روش‌های سوراخ‌کاری ورقه‌های کامپوزیتی مختلف پرداختند، که این روش‌ها شامل سوراخ‌کاری معمولی، سوراخ‌کاری سایشی، سوراخ‌کاری آلتراسونیک با مته مارپیچ و سوراخ‌کاری با سرعت بالا بوده و در آن‌ها به بررسی هندسه سر مته و نوع مواد، لایه‌لایه‌شدن ناشی از سوراخ‌کاری، نیروی محوری و سایش ابزار به منظور انتخاب بهترین روش با توجه به نوع کامپوزیت پرداختند. در این پژوهش نشان داده شد که کارایی روش‌های نوین سوراخ‌کاری نسبت به سوراخ‌کاری معمولی بهتر است. همچنین دریافتند که ابزارهای کاربیدی، ابزار با پوشش کاربیدی و الماسه چندکریستالی نتایج بهتری در مورد عمر ابزار سوراخ‌کاری در ورقه‌های کامپوزیتی می‌دهند [۴]. بر اساس گزارش‌های ارول و همکارانش لایه‌لایه شدگی سوراخ در سوراخ‌کاری ارتعاشی پلاستیک‌های تقویت شده نسبت به سوراخ‌کاری معمولی کاهش می‌یابد [۵]. وانگ و همکارانش بطور تجربی سوراخ‌کاری آلتراسونیک با فرکانس کم را بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف، بوسیله مته بررسی کردند. نتایج نشان داد که سوراخ‌کاری به

کمک ارتعاشات آلتراسونیک با فرکانس کم، می‌تواند باعث کاهش نیروی محوری شود. همچنین مدعی شده‌اند که کاهش در نیروی محوری با تغییرات در شکل براده در سوراخ‌کاری آلتراسونیک مرتبط می‌باشد [۶]. وایباو و همکارانش، به بررسی تجربی و عددی سوراخ‌کاری معمولی و آلتراسونیک بوسیله مته مارپیچ در ورقه کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که نیروی محوری در حالت سوراخ‌کاری آلتراسونیک نسبت به سوراخ‌کاری معمولی تا حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد. این نتایج بوسیله شبیه‌سازی این فرآیند در نرم افزار اجزای‌محدود آباکوس نیز تایید گردید. همچنین در سوراخ‌کاری معمولی تنش بیشتری در مجاورت سوراخ ایجاد شده به وجود می‌آید [۷].

هوشنگ و همکارانش به بررسی انواع مته‌ها از جمله مته مارپیچ معمولی و ابزارهای مخصوص در چگونگی ایجاد لایه‌لایه شدگی در ماده کامپوزیتی، به هنگام سوراخ‌کاری پرداختند و همچنین رابطه‌ی بین نیروی محوری بحرانی برای ایجاد لایه‌لایه‌شدگی در ماده پرداخته شده است و مقدار نیروی محوری بحرانی تخمین زده شد [۸]. لیو و همکارانش ماشینکاری آلتراسونیک بیضوی بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که این روش مزایای سوراخ‌کاری با ابزار هسته‌دار و ارتعاش بیضوی به منظور رسیدن به کیفیت سطح بهتر را تواماً دارد. همچنین مدل نیروی برش و براده برداری در ارتعاش بیضوی آلتراسونیک را معرفی و تحلیل کرده و با سوراخ‌کاری معمولی مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که نرخ براده برداری نسبت به سوراخ‌کاری معمولی بهبود یافته و سایش ابزار کاهش یافته است و همچنین عمر ابزار و کیفیت سطح دهانه سوراخ افزایش یافته است. لایه‌لایه شدگی دهانه سوراخ نیز از بین رفته و کاهش قابل ملاحظه‌ای در نیروی برش بدست آمد و براده‌ها و گرمای ایجاد شده با سهولت بیشتری دفع گردید [۹].

براساس مطالب پیشین، در ماشینکاری کامپوزیت‌ها، از ابزارهای برشی با شکل‌های هندسی مختلف و یا جنس‌های مختلف استفاده می‌شود. اثر هندسه ابزار برشی و جنس آن، بر کیفیت سوراخ ایجادشده، از جمله مقدار نیروی محوری و به تبعیت آن، میزان لایه‌لایه شدگی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در مقالات متعددی بررسی شده است، که در نتیجه سوراخ‌کاری با ابزار برشی هسته‌دار در کاهش مقدار نیروی سوراخ‌کاری و به تبع آن کاهش لایه‌لایه‌شدگی این کامپوزیت‌ها، بوسیله توزیع نیروی محوری به سمت محیط پیرامون ابزار مفید بوده است [۱۰].

تاکنون طبق مطالعات انجام‌یافته در فرآیند سوراخ‌کاری آلتراسونیک و اعمال ارتعاش طولی به ابزار سوراخ‌کاری هسته‌دار، بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن، پارامترهای هندسی سوراخ ایجاد شده مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش، در سوراخ‌کاری آلتراسونیک و مقایسه آن با نیروی سوراخ‌کاری معمولی، پارامترهای دایروی بودن و استوانه‌ای‌بودن سوراخ، در هر دو مکانیزم براده برداری، بررسی و با هم مقایسه شد.

۲– روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از مود طولی، یک ابزار ارتعاشی سوراخ‌کاری چرخان شامل ترانسدیوسر، متمرکزکننده و ابزار طراحی شده‌است. برای تولید ارتعاش آلتراسونیک، معمولا از یک ترانسدیوسر استفاده می‌شود. هورن یا تمرکزدهنده نقش انتقال انرژی و تمرکز آن‌را دارد. در یک مجموعه ارتعاشی، انرژی آلتراسونیک از ترانسدیوسر به متمرکزکننده منتقل می‌شود. بطور کلی، ابعاد سطح مقطع ورودی هورن بر اساس قطر ترانسدیوسر و سطح مقطع خروجی آن بر اساس سطح مقطع ابزار تعیین می‌شود. هورن مورد نظر در این پژوهش، شامل سه بخش می‌باشد که بخش ابتدایی آن به شکل استوانه‌ای است تا این امکان را داشته باشد که بتوان به راحتی به ترانسدیوسر مورد نظر، باز و بسته شود و همچنین با آن بتوان در مدت زمان طولانی، بدون گرم‌شدن مجموعه کار کرد. سپس سطح مقطع با یک پروفیل مخروطی به آرامی کوچک شده تا به متمرکز شدن انرژی آلتراسونیک کمک کند. بعد از آن بخش‌سوم، بصورت رزوه استوانه‌ای، تا آخر ادامه یافته و درون آن سوراخی مخروطی ایجاد گردید تا ابزار درون آن قرار گیرد. ابزار سوراخ‌کاری مورد استفاده در این پژوهش دارای قطر خارجی ۶ میلیمتر و ساخت شرکت شات[1] است.

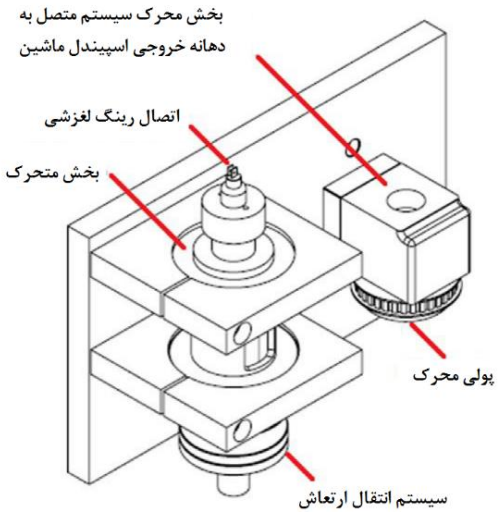
در تحلیل ارتعاشی ابزار در نرم‌افزار آباکوس، جهت تعیین ابعاد هورن، فرکانس تشدید ابزار ارتعاشی طراحی‌شده، ۲۰۴۷۰ هرتز بدست آمد.

[1] SCHOTT

جنس هورن باید دو خصوصیت مکانیکی و آکوستیکی خوب را با هم دارا باشد [۱۱]. خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت به خستگی بالا، تنش تسلیم بالا، چقرمگی شکست و مقاومت به سایش مناسب و خصوصیات آکوستیکی شامل اتلاف انرژی کم، میرایی ارتعاشات پایین و سرعت صوت بالا می‌شود. آلیاژهای آلومینیوم خواص صوتی خوبی دارند؛ و تنها مشکل اساسی آن‌ها، خواص مکانیکی نامناسب آن‌ها می‌باشد [۱۲]. این مشکل را می‌توان با انتخاب آلیاژ مناسب برطرف کرد. بنابراین جنس هورن از آلومینیوم 7075 T6 انتخاب گردید.

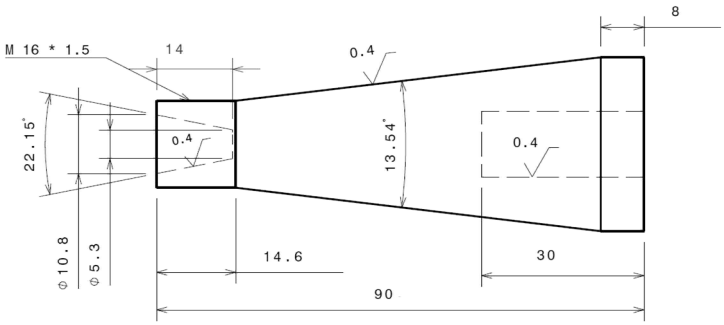
در این فرآیند، به دلیل چرخش ابزار، انتقال جریان الکتریکی به ابزار به صورت مستقیم امکان پذیر نیست و نیاز به سیستمی می‌باشد که بتواند این جریان را هنگام چرخش به ترانسدیوسر منتقل کند. برای این منظور، از وسیله‌ای بنام رینگ لغزشی استفاده شده است. این قطعه حاوی جیوه برای اتصال الکتریکی سیستم با مولد و ترانسدیوسر می‌باشد و به عنوان هادی چرخشی عمل می‌کند. در این حالت فقط کافی است این وسیله در مرکز چرخش ابزار قرار گیرد و کابل‌ها به درستی نصب شوند. به این ترتیب به سادگی و اطمینان بالا، جریان الکتریکی حین چرخش به ترانسدیوسر منتقل شده و کل سیستم دارای ارتعاش خواهد بود.

مجموعه مورد نظر ارتعاشی (ابزار ارتعاشی و ترانسدیوسر)، بر روی دستگاه فرز کنترل عددی با کامپیوتر سوار شد که نحوه برق‌رسانی به ترانسدیوسر، از طریق سیستم ذغال روی رینگ می‌باشد و دوران توسط کله‌گی دستگاه فرز و از طریق تسمه به سیستم ارتعاشی منتقل گردید. شماتیک مجموعه ابزار ارتعاشی تعبیه شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیک مجموعه ابزار ارتعاشی

در شکل ۲، نقشه‌ی هورن قبل از اتصال به ترانسدیوسر نشان داده شده است که مطابق این شکل، ابزار ارتعاشی توسط مهره به هورن متصل شده است.



شکل ۲ هورن

در این پژوهش، قطعه‌کار به وسیله قید و بند طراحی شده بر روی میز فرز محکم بسته شده و دینامومتر در زیر قطعه‌ی کار و قید و بند مربوط به آن نصب شد و حرکت پیشروی نیز در حالت خودکار تنظیم گردید.

پس از تنظیمات سرعت برشی و نرخ پیشروی مطلوب، یکبار بدون ارتعاش و یکبار هم با همان شرایط ولی همراه با ارتعاشات آلتراسونیک تمام عمق سوراخ، سوراخ‌کاری شد. انتخاب سرعت‌برشی و پیشروی با توجه به جنس قطعه‌ی‌کار، ابزار و شرایط موجود بر روی دستگاه فرز انجام شده است. جدول ۱ مقادیر تنظیم شده بر روی دستگاه، برای انجام آزمایش‌ها در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱ پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده

پارامترها	مقدار پارامترها
سرعت پیشروی(mm/min)	30 – 50 – 70
سرعت دورانی(rpm)	1000 – 1200 - 1400

در شکل ۳ کامپوزیت سوراخ شده در این آزمایش قابل مشاهده است. دو ردیف اول از بالا، سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از روش سوراخ‌کاری ارتعاشی می‌باشد و دو ردیف بعدی سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از روش سوراخ‌کاری عادی می‌باشد.

شکل ۳ قطعه کامپوزیت سوراخ‌کاری شده

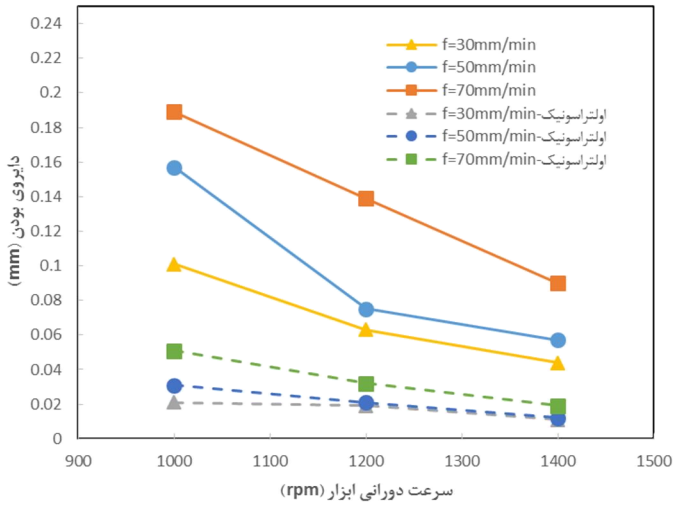
پس از انجام سوراخ‌کاری، پارامترهای دایره‌ای بودن و استوانه‌ای بودن سوراخ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های انجام شده، به دلیل اثر منفی مایع خنک‌کننده بر روی قطعه‌کار، سوراخ‌کاری بدون استفاده از مایع خنک‌کننده انجام گرفت.

۳– نتایج و بحث

تلرانس دایره‌ای بودن با توجه به انطباقات میان قطعات مختلف از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. دلیل وجود این عیب خاصیت ناهمسانگردی بین لایه‌های کامپوزیتی می‌باشد [۱۳]. مکانیزم این عیب به این ترتیب است که با حرکت لبه برنده مته درون لایه‌های ناهمسانگرد لمینت، نیروهای غیرمتقارنی در ناحیه تماس ماده و مته ایجاد می‌شود که در نقاط مختلف، جداره سوراخ در اثر این نیرو، فشرده و یا خمیده می‌شود [۱۴]. برای مثال به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی زمینه و الیاف، دستیابی به ابعاد دقیق در عملیات برش کامپوزیت بسیار مشکل است [۱۵]، و در عمل، سوراخ‌های ایجاد شده نسبت به مته مورد استفاده، قطر کمتری دارند.

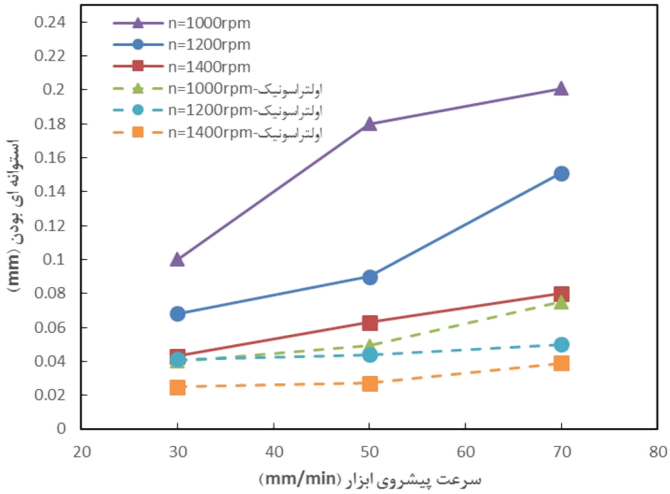
اگر به عنوان نمونه، کامپوزیتی در جهت الیاف تحت فشار قرار گیرد، کرنشی متفاوت با زمانی که در جهت عمود بر الیاف تحت فشار است، در آن به وجود می‌آید. بنابراین هنگام سوراخ‌کاری یک کامپوزیت، ممکن است سوراخی به شکل بیضی حاصل شود که قطر کوچک این بیضی، از قطر مته کمتر است و این قطر در جهت الیاف قرار دارد.

در آزمایش‌های انجام شده حالت بهینه برای میزان دایره‌ای بودن سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه است. شکل ۴ تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی را بر تلرانس دایره‌ای بودن نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش سرعت برشی و کاهش سرعت پیشروی، سوراخ بیشتر به حالت دایره‌ای نزدیک می‌شود.



شکل ۴ تاثیر سرعت دورانی بر روی دایره‌ای بودن در سرعت‌های پیشروی‌های مختلف

خطای استوانه‌ای بودن تلرانس سه بعدی است که علاوه بر دایره‌ای بودن، پارامتر دیگری به نام مستقیم بودن محور سوراخ را نیز شامل می‌شود [۱۶]. تلرانس استوانه‌ای بودن در آزمایش‌هایی که انجام شد در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، کمترین تلرانس استوانه‌ای بودن را به خود اختصاص داده است. شکل ۵ تاثیر سرعت پیشروی و سرعت دورانی را بر تلرانس استوانه‌ای بودن در دو حالت سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری آلتراسونیک نشان می‌دهد. شکل ۵ نشان می‌دهد افزایش سرعت برشی سبب کاهش تلرانس استوانه‌ای بودن و تأثیر مثبت بر روی این تلرانس دارد. همچنین افزایش سرعت پیشروی موجب افزایش تلرانس استوانه‌ای بودن می‌شود. در واقع تلرانس استوانه‌ای ترکیبی از تلرانس دایره‌ای بودن و قطر سوراخ است.



شکل ۵ تاثیر نرخ پیشروی بر روی استوانه‌ای بودن در سرعت‌های دورانی مختلف

مطابق شکل ۵ اضافه شدن ارتعاشات آلتراسونیک به حرکت ابزار، باعث کاهش نیروی محوری سوراخ‌کاری شده و پایداری مجموعه را به طور محسوس زیاد می‌کند. همچنین در سوراخ‌کاری معمولی به دلیل برش پیوسته، نیروی وارده از طرف قطعه‌کار به سر ابزار زیاد می‌باشد [۱۷]. بنابراین، ابزار در ابتدای سوراخ به مقدار کافی پایدار نبوده و نوک ابزار دچار لغزش می‌شود. لغزش سر ابزار علاوه بر اینکه باعث می‌شود سوراخ‌کاری در موقعیت مورد نظر انجام نشود، باعث می‌شود که ابتدای سوراخ حالت گرد بودن خود را نیز از دست بدهد که این اثر بویژه در سوراخ‌کاری با قطر زیاد مشهودتر است. در سوراخ‌کاری آلتراسونیک، به دلیل اینکه ابزار بصورت منقطع و ضربه‌ای شروع به سوراخ‌کاری می‌کند، براده‌برداری بصورت منقطع انجام می‌شود و نیروی وارده از سوی قطعه‌ی‌کار به ابزار کاهش می‌یابد [۱۸]. این کاهش نیرو باعث می‌شود که ابزار از مسیر خود منحرف نشده و شکل پروفیل ابتدای سوراخ حفظ شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی دقت ابعادی در فرایند سوراخ‌کاری آلتراسونیک و مقایسه آن با سوراخ‌کاری معمولی پرداخته شد. سیستم ارتعاشی برای ابزار طراحی و ساخته شد. تحلیل مودال برای رسیدن به مود طولی ابزار ارتعاشی منطبق بر فرکانس تشدید ترانسدیوسر با نرم‌افزار اجزای محدود انجام گردید. برای ایجاد قابلیت ارتعاش و دوران مته، یک سیستم سوراخ‌کاری ارتعاشی چرخشی طراحی و ساخته شد. این سیستم قادر است که به طور همزمان قابلیت دوران و ارتعاش را به ابزار برش بدهد. پس از مونتاژ مجموعه و اطمینان از عملکرد صحیح و مناسب ابزار ارتعاشی، آزمایش‌ها بر روی قطعه‌کار انجام گردید. آزمایش‌ها در سرعت‌ها و نرخ‌های متفاوت انجام شده است. نتایج پژوهش در ادامه ارایه می‌گردد:

- مقدار دایروه‌ای بودن در فرآیند سوراخ‌کاری آلتراسونیک نسبت به سوراخ‌کاری معمولی، ۸۰٪ کاهش یافته و باعث بهبود دقت ابعادی سوراخ شده است.
- مقدار استوانه‌ای بودن سوراخ، در فرآیند سوراخ‌کاری آلتراسونیک نسبت به سوراخ‌کاری معمولی ۷۲٪ کاهش یافته است.

References

[1] Chern G-L, Lee H-J. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 2006;27:688-92. doi: 10.1007/s00170-004-2255-8

[2] Chang SS, Bone GM. Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6. Precision Engineering: 2010;34(3):369-75. doi: 10.1016/j.precisioneng.2009.09.002

[3] Neugebauer R, Stoll A. Ultrasonic application in drilling. Journal of materials processing technology: 2004;149(1-3):633-9. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.062

[4] Liu D, Tang Y, Cong W. A review of mechanical drilling for composite laminates. Composite structures: 2012;94(4):1265-79. doi: 10.1016/j.compstruct.2011.11.024

[5] Arul S, Vijayaraghavan L, Malhotra S, Krishnamurthy R. The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites. International Journal of Machine Tools and Manufacture: 2006;46(3-4):252-9. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.023

[6] Wang X, Wang L, Tao J. Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics. Journal of Materials Processing Technology: 2004;148(2):239-44. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.12.019

[7] Phadnis VA, Makhdum F, Roy A, Silberschmidt VV. Experimental and numerical investigations in conventional and ultrasonically assisted drilling of CFRP laminate. Procedia Cirp: 2012;1:455-9. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.081

[8] Hocheng H, Tsao C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture: 2006;46(12-13):1403-16. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.10.004

[9] Liu J, Zhang D, Qin L, Yan L. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). International Journal of Machine Tools and Manufacture: 2012;53(1):141-50. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.10.007

[10] Amin S, Ahmed M, Youssef H. Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis. Journal of Materials Processing Technology: 1995;55(3-4):254-60. doi: 10.1016/0924-0136(95)02015-2

[11] Banerjee B, Pradhan S, Das S, Chakraborty A, Dhupal D. Horn design and analysis in ultrasonic machining process using ANSYS. Advances in Materials and Processing Technologies: 2022;8(sup3):1359-72. doi: 10.1080/2374068X.2021.1945266

[12] Singh DP, Mishra S, Porwal RK. Modal analysis of ultrasonic horn using finite element method. Materials Today: Proceedings: 2019;18:3617-23. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.293
[13] Amini S, Baraheni M, Mardiha A. Parametric investigation of rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced plastics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering: 2018;232(5):540-54. doi: 10.1177/0954408917727199
[14] Abdelkawy A, El-Hofy H. Experimental and statistical study for measurements of surface roughness and hole geometry of ultrasonic-assisted drilling of soda glass. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering: 2021;43:1-11. doi: 10.1007/s40430-021-03172-5
[15] Baraheni M, Tabatabaeian A, Amini S, Ghasemi AR. Parametric analysis of delamination in GFRP composite profiles by performing rotary ultrasonic drilling approach: Experimental and statistical study. Composites Part B: Engineering: 2019;172:612-20. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.05.057
[16] Amini S, Baraheni M, Moeini Afzal M. Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. Journal of science and technology of composites: 2018;5(1):41-50. doi: 10.22068/JSTC.2018.28562
[17] Wang J, Zha H, Feng P, Zhang J. On the mechanism of edge chipping reduction in rotary ultrasonic drilling: a novel experimental method. Precision Engineering: 2016;44:231-5. doi: 10.1016/j.precisioneng.2015.12.008
[18] Baraheni M, Amini S. Feasibility study of delamination in rotary ultrasonic-assisted drilling of glass fiber reinforced plastics. Journal of Reinforced Plastics and Composites: 2018;37(1):3-12. doi: 10.1177/0731684417729565