



Enhancement of Machining Quality in Polymeric CNT-Reinforced Composites Subjected to Thermal Fatigue

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Baraheni M.¹ PhD,
Tabatabaeian A.¹ MSc,
Ghasemi A.¹ PhD,
Amini S.^{*1} PhD

How to cite this article

Baraheni M, Tabatabaeian A, Ghasemi A, Amini S. Enhancement of Machining Quality in Polymeric CNT-Reinforced Composites Subjected to Thermal Fatigue. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(7):1731-1740.

¹Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, Kashan University, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Kashan University, 6km of Qutb Ravandi Boulevard Kashan, Iran. Postal Code: 8731753153
Phone: +98 (31) 55912497
Fax: +98 (31) 55511121
amini.s@kashanu.ac.ir

Article History

Received: September 23, 2019
Accepted: December 14, 2019
ePublished: July 20, 2020

ABSTRACT

Thermal fatigue is one of the most important issues in different engineering fields. The importance of this phenomenon is its application in aerospace industries and considerable effects on the material properties. In this research, the effect of thermal fatigue on the machining quality of polymeric CNT-reinforced composites is studied. To follow this aim, initially the composite specimens with eight layers in symmetrical and unsymmetrical layups are fabricated and subjected to thermal cycling. Then, two different machining processes including conventional drilling and ultrasonic vibration assisted drilling are carried out and the thermal fatigue effects are experimentally studied. Additionally, the effects of various parameters including “addition of multi wall carbon nanotube”, “machining process” and “layup method” on machining quality of composites under thermal fatigue condition is investigated in order to obtain the least delamination. The results indicated that addition of multi-walled carbon nanotubes enhances the machining quality up to 13%. It was also revealed that the implement of ultrasonic assisted drilling could reduce the delamination damage up to 10%.

Keywords Thermal Fatigue, Delamination, Multi-Walled Carbon Nanotube, Ultrasonic Assisted Drilling, Layup

CITATION LINKS

[1] Experimental studies on morphology and impact behavior of ... [2] Study of delamination in the process helical milling of ... [3] Effects of machining parameters on delamination in ... [4] On the optimal design of manufacturing-induced residual stresses in filament wound ... [5] Machining of polymer ... [6] Turning of fiber-reinforced plastics, machining of ceramics ... [7] Failure of tungsten carbide-cobalt alloy tools in machining of ... [8] Drilling of fiber reinforced plastics: A ... [9] Feasibility study of delamination in rotary ultrasonic-assisted drilling of glass fiber ... [10] Enhancing dimensional accuracy and surface integrity by helical milling of ... [11] Fundamentals of metal machining and machine ... [12] Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber ... [13] Predicting subsurface damage in silicon nitride ceramics subjected to ... [14] Comprehensive optimization of process parameters in rotary ultrasonic drilling of CFRP ... [15] Investigating the effect of rotation speed and ultrasonic vibrations in the ... [16] Vibration drilling of ... [17] Ultrasonic-assisted drilling of Inconel ... [18] Analysis of ultrasonic-assisted drilling of ... [19] Drilling assisted by ultrasonic elliptical ... [20] Using workpiece vibration ... [21] Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum ... [22] Ultrasonic application in ... [23] A review of mechanical drilling for composite ... [24] The effect of vibratory drilling on hole quality in ... [25] Investigation on delamination morphology during ... [26] Experimental and numerical investigations in conventional and ... [27] Effects of special drill bits on drilling-induced delamination ... [28] Influence of graphene nanoplatelets (GNPs) on mode I fracture ... [29] Residual stress and failure analyses of polymer matrix ... [30] Application of slitting method to characterize the effects of thermal ... [31] Curvature changes and weight loss of polymeric nano-composite ... [32] Mechanical durability of an optimized polymer concrete ... [33] Rotary ultrasonic machining: A ... [34] Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling ... [35] Experimental analysis of the influence of drill point angle and ... [36] Statistical study of the effect of various ... [37] Specification of non-uniform residual stresses ... [38] Machining and tool ... [39] Machining and cutting ... [40] Study of the effect of machining parameters on ... [41] Parametric investigation of rotary ultrasonic ... [42] Review of vibration-assisted ... [43] Preliminary study on rotary ultrasonic ... [44] Delamination in ... [45] Curvature changes and weight loss of ... [46] Characterization of residual stresses in a thin-walled filament wound carbon/epoxy ring ...

بهبود کیفیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری تقویت‌شده با ذرات نانولوله کربنی تحت شرایط خستگی حرارتی

محمد براهنی PhD

گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

علی طباطبائی‌ان MSc

گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

احمد رضا قاسمی PhD

گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

سعید امینی* PhD

گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

پدیده خستگی حرارتی همواره یکی از مباحث مورد توجه محققین در رشته‌های مختلف مهندسی بوده است. اهمیت این پدیده در کاربردهای وسیع آن در صنایع هوافضا و تأثیرات قابل توجه آن بر خواص مواد کامپوزیتی است. در این پژوهش، به بررسی تأثیر خستگی حرارتی بر کیفیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری تقویت‌شده با ذرات نانولوله کربنی پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی ۸ لایه با چیدمان‌های متقارن و نامتقارن ساخته شده و در معرض چرخه حرارتی قرار داده می‌شوند. سپس، نمونه‌ها تحت دو نوع فرآیند ماشین‌کاری شامل ماشین‌کاری معمولی و ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک قرار گرفته و تأثیرات خستگی حرارتی به صورت تجربی مطالعه می‌شود. همچنین، تأثیرات پارامترهای متفاوتی از جمله افزودن ذرات نانولوله کربنی چندجداره، فرآیند ماشین‌کاری و نحوه لایه‌گذاری، بر کیفیت ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی تحت خستگی حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است تا کمترین میزان لایه‌لایه‌شدگی به دست آید. نتایج نشان داد که افزودن ذرات نانولوله کربنی چندجداره منجر به بهبود کیفیت ماشین‌کاری تا ۱۳٪ می‌شود. همچنین مشخص شد که به کارگیری روش سوراخ‌کاری اولتراسونیک می‌تواند میزان لایه‌لایه‌شدگی را تا ۱۰٪ کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: خستگی حرارتی، لایه‌لایه‌شدگی، نانولوله کربنی چندجداره، سوراخ‌کاری اولتراسونیک، چیدمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

*نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

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 [1, 2]. قطعات کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه با توجه به نسبت بالای استحکام به وزن، نسبت بالای مدول کششی به وزن و استحکام بالای خستگی امروزه در صنایع مختلف بسیار حایز اهمیت هستند [3]. سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی یکی از فرآیندهای مهم و چالش‌برانگیز در ساخت سازه‌های صنعتی است. دلیل آن، ضریب هدایت حرارتی پایین و استحکام بالای این مواد است [4]. طیف گسترده‌ای از ابزارهای مختلف برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها در

دسترس است. ابزار کاربرد سمانته به علت ساینده‌گی بالای کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین به علت پایین بودن سختی قطعات کامپوزیتی نسبت به فلزات و سایش زیاد ابزار در کامپوزیت‌ها ابزارهای سرامیکی برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها مناسب هستند [5]. ابزارهای پلی‌کریستال الماس و پلی‌کریستال نیتريدیور مانند سرامیک‌ها به علت سختی بالا، اتلاف گرما و مقاومت سایش عالی، ابزارهای مناسبی برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها هستند [6, 7]. ولی قیمت این ابزارها بالا بوده و اکثراً مقرون به صرفه نیستند [8]. همچنین از ابزارهای هسته‌دار الماسه نیز توسط محققان برای جلوگیری از لایه‌لایه‌شدگی استفاده شده است [9].

از طرفی قابلیت ماشین‌کاری پایین، متفاوت بودن خواص مکانیکی در جهات متفاوت و همچنین استحکام بین لایه‌ای کمتر باعث افزایش تمایل کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف به ایجاد لایه‌لایه‌شدگی در آنها شده است [10]. دو مشکل اساسی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، سایش ابزار و لایه‌لایه‌شدگی است. بروز این دو عیب در کامپوزیت‌ها، باعث کاهش استحکام خستگی و ایجاد مشکل در مونتاژ آنها می‌شود.

نحوه حرکت نسبی بین ابزار و قطعه کار، می‌تواند توانایی برش را تغییر دهد [11]. یکی از روش‌های سوراخ‌کاری کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف، استفاده از روش سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک است. سوراخ‌کاری چرخشی اولتراسونیک یک روش جدید است که طی آن در این روش، ابزار همزمان با چرخش، دارای ارتعاش طولی نیز است. افزودن ارتعاشات به صورت یک‌بعدی یا دوبعدی به این ابزار، رفتار فرآیندهای ماشین‌کاری و تخلیه براده را بهبود می‌بخشد [12].

مبنای فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک مانند سوراخ‌کاری معمولی است با این تفاوت که برای بهبود شرایط ماشین‌کاری، ارتعاشات طولی نیز به حرکت مته اضافه می‌شود [13]. به منظور ایجاد ارتعاش در ابزار، باید آن را به سیستم ارتعاشی متصل نمود. بنابراین ابزار به هورن و سپس هورن به مبدل متصل می‌شود. وظیفه مبدل، تبدیل امواج الکتریکی به ارتعاش مکانیکی است [14]. هندسه هورن، بستگی به کاربرد و فرکانس مورد نظر دارد. بنابراین برای هر فرآیندی که از ارتعاش اولتراسونیک استفاده می‌شود باید هورن متناسب با آن فرآیند طراحی و ساخته شود [15].

محققان، پژوهش‌های متعددی بر روی فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک انجام داده‌اند. در پژوهش /مینی و همکاران [16]، به مطالعاتی بر روی سوراخ‌کاری چرخشی اولتراسونیک با مته مارپیچ، با استفاده از ارتعاش طولی ابزار پرداخته شده است. ارتعاش طولی با فرکانس بالا و دامنه کم به ابزار اعمال و تأثیر ارتعاشات بر روی قطعه کار آلومینیومی و مقایسه آن با سوراخ‌کاری معمولی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که نیروی محوری نسبت به سوراخ‌کاری معمولی کاهش می‌یابد. آذرهوشنگ و /کبری، سوراخ‌کاری اولتراسونیک اینکونل را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند کیفیت سطح در استفاده از این روش بهبود می‌یابد [17]. پوجانا و همکاران،

انواع مته‌ها از جمله مته مارپیچ معمولی و ابزارهای مخصوص در چگونگی ایجاد لایه‌لایه‌شدگی در ماده کامپوزیتی، به هنگام سوراخ‌کاری پرداختند و همچنین در این مطالعه به رابطه بین نیروی محوری بحرانی برای ایجاد لایه‌لایه‌شدگی در ماده پرداخته شده است و مقدار نیروی محوری بحرانی تخمین زده شد [27]. لیو و همکاران، ماشین‌کاری اولتراسونیک چرخشی بیضوی بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که این روش مزایای سوراخ‌کاری با ابزار هسته‌دار و ارتعاش بیضوی به‌منظور رسیدن به کیفیت سطح بهتر را توأم دارد [12].

یکی از موضوعاتی که همواره در علوم مختلف مهندسی مورد بررسی بوده، پدیده خستگی حرارتی و تاثیر آن بر خواص سازه‌های مهندسی است [28]. خواص مکانیکی و رفتاری نمونه‌هایی که در معرض شرایط خستگی حرارتی بوده‌اند در پژوهش‌هایی، به تفصیل بررسی و بیان شده‌اند [29]. همچنین در تحقیق دیگری [30]، رفتار تنشی و شکست مواد کامپوزیتی تحت شرایط خستگی حرارتی به‌صورت تجربی و تحلیلی بررسی شده‌اند. در پژوهشی [31]، تغییر شکل و تغییر وزن نمونه‌ها و همچنین تاثیر نوع رزین در شرایط خستگی حرارتی به‌صورت کامل بررسی شده است.

در این پژوهش، ابتدا تاثیر این پدیده بر کیفیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری مورد مطالعه قرار گرفته است؛ سپس، به‌منظور کاهش تاثیر مخرب چرخه حرارتی، سه پارامتر مختلف شامل نوع فرآیند ماشین‌کاری، افزودن ذرات نانو و چیدمان لایه‌ها در نظر گرفته شده و تاثیر آنها بر بهبود کیفیت ماشین‌کاری به‌صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌های کامپوزیتی با درصد‌های وزنی متفاوت ذرات نانو و چیدمان‌های متقارن $S[0^\circ/90^\circ]$ و نامتقارن $T[0^\circ/90^\circ]$ ساخته شده و تحت شرایط خستگی حرارتی قرار گرفتند. سپس، دو نوع فرآیند ماشین‌کاری، سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری اولتراسونیک در سرعت‌های برشی متفاوت انجام شدند.

آزمایش‌های تجربی

ساخت نمونه‌ها

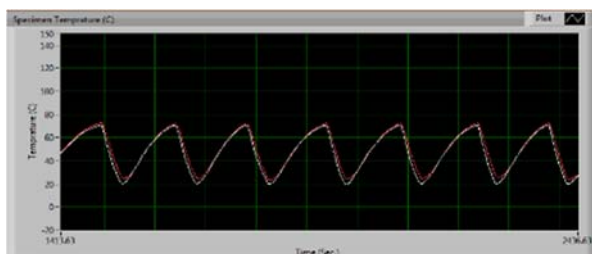
برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه تک‌جهته و دو نوع رزین متفاوت به نام‌های KER 828 (شرکت کومهو؛ کره جنوبی) و ML 506 (شرکت مکر؛ ایران) استفاده شده است. نمونه‌هایی که در آنها از رزین KER 828 استفاده شده است با چیدمان‌های متقارن $S[0^\circ/90^\circ]$ و نامتقارن $T[0^\circ/90^\circ]$ و نمونه‌هایی که در آنها از رزین ML 506 استفاده شده است با چیدمان نامتقارن $T[0^\circ/90^\circ]$ ساخته شده‌اند. در هر دو گروه، الیاف و رزین به نسبت حجمی ۴۵ و ۵۵٪ ترکیب شده‌اند. همچنین در نمونه‌های نانوکامپوزیتی، زمینه با ۰، ۲۵٪ و ۵۰٪ از ذرات نانولوله کربنی چندجداره (شرکت آویژه؛ ایران) تقویت شده است. مخلوط رزین و ذرات نانو به مدت ۹۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در دستگاه اولتراسونیک Hielscher UP400S مورد همگن‌سازی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌ها به روش چیدمان دستی و به

نشان دادند که در سوراخ‌کاری اولتراسونیک با قطعه‌کار از جنس تیتانیوم، براده‌ها به‌صورت ناپیوسته ایجاد می‌شوند در حالی که در سوراخ‌کاری معمولی، براده‌های به هم پیوسته ایجاد می‌شدند. علت این امر ارتعاشات اولتراسونیک و برخوردهای مداوم سر مته با براده‌ها بیان شده است [18]. ما و همکاران، سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات دوبعدی یا بیضوی را بر روی قطعه‌کار آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، نیروی محوری تا یک‌سوم، نیروی شعاعی تا یک‌دوم و ضخامت براده از یک‌دوم تا یک‌سوم کاهش یافتند [19]. چرن و لی [20]، 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. چونگ و بون، نیروی محوری را در سوراخ‌کاری ارتعاشی آلومینیوم مدل‌سازی کرده و مدلی برای ارتفاع پلیسه در سوراخ‌کاری ارائه دادند [21]. نوجبایر و استول، به‌صورت تجربی نشان دادند که در سوراخ‌کاری ارتعاشی آلیاژهای آلومینیوم، عمر ابزار نسبت به روش معمولی بهبود می‌یابد [22].

لیو و همکاران [23]، به بررسی و مقایسه انواع روش‌های سوراخ‌کاری ورقه‌های کامپوزیتی مختلف پرداختند، که این روش‌ها شامل سوراخ‌کاری معمولی، سوراخ‌کاری سایشی، سوراخ‌کاری اولتراسونیک با مته مارپیچ و سوراخ‌کاری با سرعت بالا بوده و در آنها به بررسی هندسه سر مته و نوع مواد، لایه‌لایه‌شدگی ناشی از سوراخ‌کاری، نیروی محوری و سایش ابزار به‌منظور 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 کاربایدی، ابزار با پوشش کاربایدی و پلی‌کریستال الماس نتایج بهتری در مورد عمر ابزار سوراخ‌کاری در ورقه‌های کامپوزیتی می‌دهند. براساس گزارش‌های /رول و همکاران، لایه‌لایه‌شدگی سوراخ در سوراخ‌کاری ارتعاشی پلاستیک‌های تقویت‌شده نسبت به سوراخ‌کاری معمولی کاهش می‌یابد [24]. وانگ و همکاران، به‌طور تجربی سوراخ‌کاری اولتراسونیک با فرکانس کم را بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف، به وسیله مته بررسی کردند. نتایج نشان داد که سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس کم، می‌تواند باعث کاهش نیروی محوری شود. همچنین مدعی شدند که کاهش در نیروی محوری با تغییرات در شکل براده در سوراخ‌کاری اولتراسونیک مرتبط است [25]. فادنیس و همکاران، به بررسی تجربی و عددی سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری اولتراسونیک به وسیله مته مارپیچ در ورقه کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف پرداختند. بررسی آنها نشان داد که نیروی محوری در حالت سوراخ‌کاری اولتراسونیک نسبت به سوراخ‌کاری معمولی تا حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد. این نتایج به وسیله شبیه‌سازی این فرآیند در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نیز تایید شد. همچنین در سوراخ‌کاری معمولی تنش بیشتری در مجاورت سوراخ ایجاد شده به وجود می‌آید [26]. هوچنگ و سائو، به بررسی



شکل (۲) تصویر دستگاه سیکل حرارتی



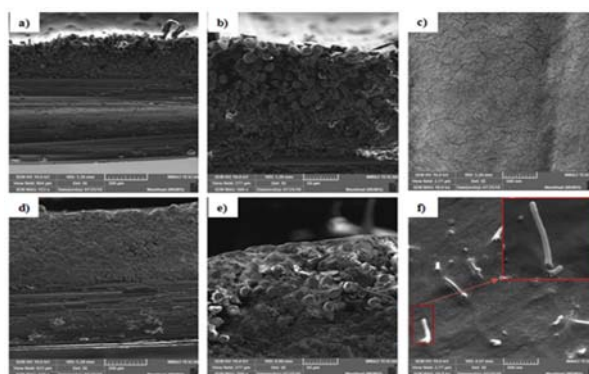
نمودار (۱) پروفیل دمایی

فرآیند ماشین‌کاری

جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه فرز یونیورسال با کنترل کامپیوتری نوع FP4M ساخت ماشین‌سازی تبریز با دقت 0.01 mm و مدل اولتراسونیک با فرکانس تشدید $1 \pm 22/5$ کیلوهرتز استفاده شد. در نتیجه باید هندسه مجموع ابزار و نگهدارنده ابزار به نحوی طراحی می‌شد که فرکانس تشدید در این محدوده قرار داشته باشد. برای انجام این کار، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است و پس از تغییرات مکرر در هندسه مجموعه ابزار ارتعاشی، فرکانس تشدید 22600 هرتز به دست آمد. برای انجام این کار، المان‌ها به صورت سه‌بعدی و از نوع تتراگونال انتخاب شدند. جهت یافتن مقدار فرکانس، از تحلیل مودال استفاده شد. اندازه مش‌بندی از 1 mm آغاز شد. جهت اطمینان از مدل طراحی‌شده، تحلیل نوع مش، اندازه و تعداد مش‌ها، انجام‌شده و مشاهده شد که تاثیر قابل توجهی بر مقدار فرکانس به دست آمده ندارد. شکل ۳ مونتاژ، مش‌بندی و تحلیل مودال مجموعه ابزار ارتعاشی را در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد. قبل از انجام آزمایش‌ها، امکان‌پذیری سرعت‌های برشی و پیشروی بالا و پایین بررسی شد. سرعت‌های برشی پایین‌تر از 15 m/min بر دقیقه منجر به نیروی بیشتر و خم‌شدن صفحه کامپوزیتی و سرعت‌های بالاتر نیز موجب ایجاد لرزش در دستگاه فرز مورد استفاده می‌شدند. همچنین در انتخاب محدوده سرعت‌های برشی و پیشروی، سایر

شکل ورق ساخته‌شده و دما و زمان پخت هر گروه از نمونه‌ها مطابق با مقادیر پیشنهادی در کاتالوگ رزین مربوطه در نظر گرفته شده است [31].

همچنین جهت مشاهده توزیع مناسب نانوذرات، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی MIRA3 TESCAN (شرکت LEO؛ آلمان) استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های با 0.5% ذرات نانو در شکل ۱ نمایش داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهد که توزیع ذرات نانو به صورت مناسبی شکل گرفته و پدیده‌هایی مثل انباشتگی در نتایج به دست آمده تاثیر قابل توجهی نداشته‌اند. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی $20000\times$ برابر؛ a-c: بدون نانولوله چندجداره کربنی، d-f: 0.5% نانولوله چندجداره کربنی؛ مدل دستگاه: VP 1450 (شرکت LEO؛ آلمان)

جدول (۱) پارامترهای فرآیند

پارامتر	تعداد سطوح	مقادیر
سیکل خستگی حرارتی	۲	بدون سیکل - 200°C سیکل
سرعت برشی	۳	$15, 25, 35 \text{ m/min}$ بر دقیقه
سرعت پیشروی	۱	0.05 mm/rev
ارتعاش اولتراسونیک	۲	بدون و با ارتعاش اولتراسونیک
چیدمان	۲	متقارن - نامتقارن
ذرات نانولوله کربن	۳	$0, 0.25, 0.5\%$

آزمایش خستگی حرارتی

برای ایجاد شرایط خستگی حرارتی، از یک دستگاه سیکل حرارتی مطابق با شکل ۲ استفاده شده است. همان طور که در تصویر مشخص است، این دستگاه متشکل از یک محفظه گرم و یک محفظه سرد و یک سیستم ریلی بوده که باعث جابجایی نمونه بین این دو محفظه می‌شود [31]. نمونه‌های ساخته‌شده با رزین KER 828 تحت 200°C سیکل گرمایشی و نمونه‌های ساخته‌شده با رزین ML 506 تحت 150°C سیکل گرمایشی قرار داده شدند. محدوده دمایی برای تمامی نمونه‌ها بین 25 تا 70°C درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد [32]. همچنین پروفیل دمایی این تحقیق در نمودار ۱ نمایش داده شده است.

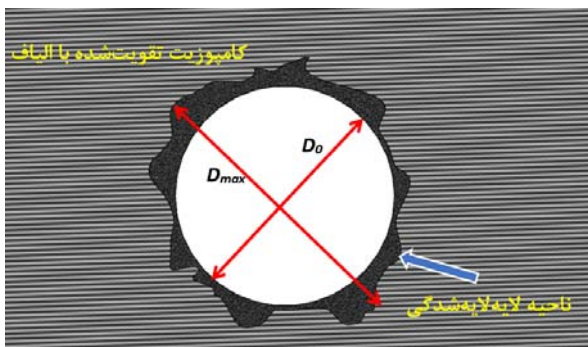
همچنین موقعیت سوراخ‌ها به فاصله ۲ سانتی‌متر (۴ برابر قطر سوراخ) از هم قرار گرفتند. بدین وسیله از تاثیر متقابل لایه‌لایه‌شدگی سوراخ‌ها بر همدیگر جلوگیری می‌شود. موقعیت سوراخ‌ها نسبت به دیواره‌ها و نسبت به هم بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی تاثیرگذار هستند که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. البته فیتو و همکاران [35]، نشان دادند که این فاصله‌ها تاثیر قابل توجهی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی ندارند و می‌توان از آنها چشم‌پوشی کرد.

برای اندازه‌گیری میزان لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت از روابط مختلفی به‌عنوان معیار لایه‌لایه‌شدگی استفاده شده است تا بتوان در شرایط و در مواد مختلف مقدار این آسیب را تحت مقایسه قرار داد که در اینجا از رابطه ۱ استفاده می‌شود [36]:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (1)$$

در این رابطه D_{max} حداکثر قطر لایه‌لایه‌شدگی (میلی‌متر)، و D_0 قطر سوراخ (میلی‌متر)، و F_d معیار لایه‌لایه‌شدگی (میلی‌متر) است. شماتیک این روش در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری معیار لایه‌لایه‌شدگی ابتدا قطر سوراخ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری بینایی اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری حداکثر قطر لایه‌لایه‌شدگی، نقاط آسیب‌دیده در اطراف سوراخ انتخاب و بر مبنای این نقاط، بزرگ‌ترین دایره ممکن رسم شد و قطر آن به‌عنوان D_{max} انتخاب شد. در این پژوهش هر آزمون سوراخ‌کاری سه بار تکرار شد و مقدار میانگین در نمودارها نشان داده شد و تحت بررسی قرار گرفت. مقدار تغییرات مقدار لایه‌لایه‌شدگی در هر آزمون نیز به‌صورت نوار خطا در نمودارها نشان داده شده است.

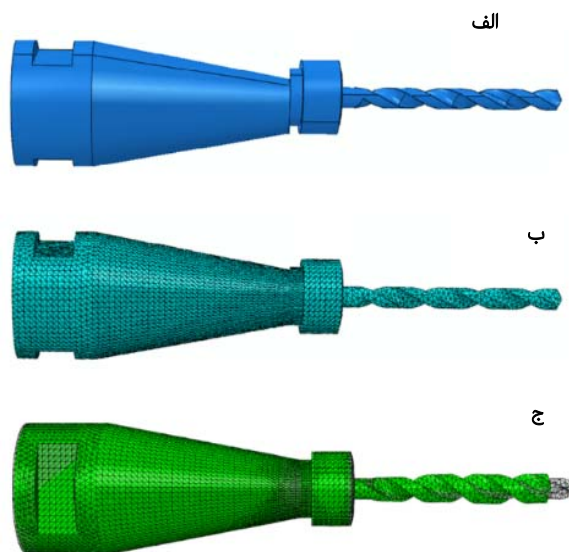


شکل ۵) شماتیک ناحیه لایه‌لایه‌شدگی در فرآیند سوراخ‌کاری

تفسیر و تحلیل نتایج

تغییرات خواص مواد کامپوزیتی تحت شرایط خستگی حرارتی همواره موضوعی چالش‌برانگیز در علوم مختلف مهندسی جدید مانند ساخت فضاپیماها بوده است و محققین زیادی تاکنون به بررسی تاثیرات این پدیده پرداخته‌اند [37]. قرارگیری کامپوزیت‌ها در معرض تغییرات دمایی متناوب، باعث تخریب سطح زمینه و در نتیجه کاهش کیفیت ماشین‌کاری این مواد می‌شود. نمودار ۲ تغییرات کیفیت ماشین‌کاری یک نمونه کامپوزیتی که در معرض ۲۰۰ سیکل حرارتی بین دمای ۲۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته را

پژوهش‌ها در حوزه ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گرفت [33]. آماده‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳) مجموعه ابزار ارتعاشی: (الف) مونتاژ، (ب) مش‌بندی، (ج) تحلیل مودال

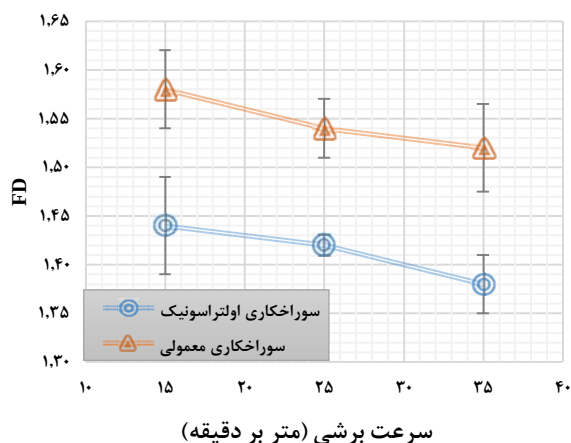


شکل ۴) آماده‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک

جهت اعمال فرکانس تشدید به مجموعه ارتعاشی از ژنراتور مدل MPI استفاده شد. دامنه ارتعاش بهینه به وسیله ژنراتور اولتراسونیک تنظیم شده است. مقدار دامنه ارتعاش اولتراسونیک در آزمایش‌ها مقدار ثابت ۸ میکرومتر است که با استفاده از سنسور دامنه‌سنج ارتعاش اولتراسونیک نوع PU-90 (شرکت AEC؛ ژاپن) اندازه‌گیری شد. در آزمایش‌ها از مایع خنک‌کننده به‌علت آلودگی کامپوزیت‌ها به مایع خنک‌کاری استفاده نشده است. همچنین ورق کامپوزیتی با گیربندی مناسب بر روی دستگاه فرز محکم شد تا از هر گونه ارتعاش و جابجایی جلوگیری شود. از آنجایی که هر چه قطر ابزار بیشتر باشد نیروی محوری بیشتری ایجاد شده و مقدار آسیب لایه‌لایه‌شدگی نیز افزایش می‌یابد [34]، در نتیجه در این تحقیق، ابزار از جنس تنگستن کارباید با قطر پایین ۵ میلی‌متر استفاده شده است.

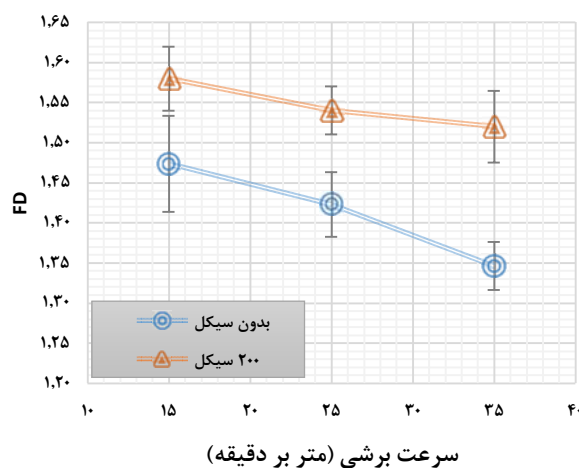
اصطکاک به دلیل عدم چسبندگی براده به لبه ابزار کاهش می‌یابد. در سوراخ‌کاری چرخشی اولتراسونیک، چسبندگی براده کم می‌شود که دلیل آن کاهش طول تماس براده با ابزار و در نهایت کاهش اصطکاک است. دلیل دیگر عدم صفر بودن سرعت نسبی نوک مته است که به علت افزوده شدن حرکت ارتعاشی به ابزار، سرعت نسبی نوک ابزار در فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک صفر نیست. این در حالی است که در فرآیند سوراخ‌کاری معمولی این سرعت صفر است که سبب می‌شود تغییر شکل پلاستیک ماده جلوی ابزار بسیار بیشتر از تغییر شکل در سوراخ‌کاری اولتراسونیک باشد. این کاهش در تغییر شکل پلاستیک در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی، عامل دیگری در کاهش اصطکاک و چسبندگی است. بنابراین شرایط نوک ابزار از حالت ایستایی در فرآیند سوراخ‌کاری معمولی به حالت جنبشی در فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک تبدیل می‌شود [41]. دلیل سوم کاهش سایش ابزار است. سایش ابزار یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش نیروی ماشین‌کاری است. در ماشین‌کاری معمولی، به دلیل تماس و درگیری مداوم ابزار با قطعه کار، ابزار خیلی زودتر نسبت به ماشین‌کاری ارتعاشی کند شده است و با از دست دادن برزندگی خود، نیروی ماشین‌کاری افزایش پیدا می‌کند. با افزودن ارتعاش به حرکت ابزار در فرآیند سوراخ‌کاری، سایش ابزار کمتر شده و نیرو نسبت به سوراخ‌کاری معمولی کاهش خواهد یافت [42]. گرمایش موضعی بر اثر ارتعاش اولتراسونیک و ضربه پیوسته ابزار به قطعه کار دلیل دیگری است که باعث نرم شدن زمینه کامپوزیتی در ناحیه ماشین‌کاری می‌شود که در نتیجه مقدار لایه‌لایه‌شدگی کاهش می‌یابد [40].

تأثیر ارتعاش اولتراسونیک بر کاهش مقدار لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن با رویه تیتانیوم [43]، کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه [44] توسط سایر پژوهشگران نشان داده شده است. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که در روش سوراخ‌کاری اولتراسونیک، کیفیت سوراخ به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر شده است و بیرون زدگی الیاف کمتر شده و لایه‌لایه‌شدگی اطراف سوراخ نیز کاهش یافته است.



نمودار ۳) مقایسه مقدار لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری اولتراسونیک

نمایش می‌دهد. همان طور که در نمودار ۲ مشخص است، پدیده لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های تحت شرایط خستگی حرارتی به صورت مشهودی افزایش یافته است. در قسمت‌های بعدی، در مورد تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری و اصلاح خود ماده کامپوزیتی به منظور بهبود تأثیرات مخرب خستگی حرارتی بر کیفیت ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی به تفکیک بحث می‌شود.



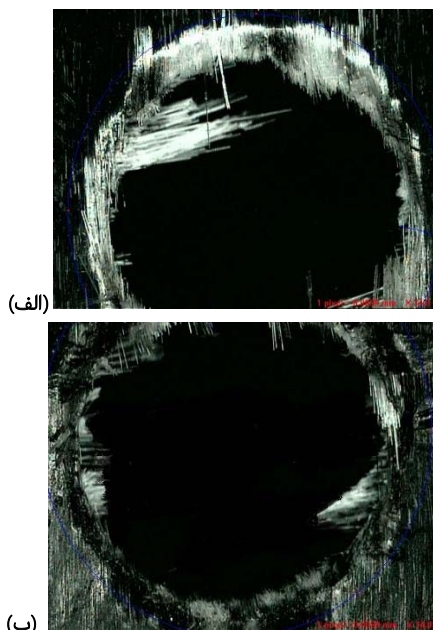
نمودار ۲) مقایسه لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تحت سیکل حرارتی (۲۰۰ سیکل) و بدون سیکل

همچنین در نمودار ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی مقدار لایه‌لایه‌شدگی کاهش یافته است. افزایش سرعت برشی در فرآیندهای ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها موجب افزایش دما می‌شود که به علت اصطکاک بین ابزار و قطعه کار است [38]. بنابراین افزایش سرعت برشی موجب کاهش نیرو می‌شود [39]. در نتیجه نیرو و گشتاور کمتری بر الیاف وارد آمده، سبب گرم شدن رزین می‌شود و محدوده لایه‌لایه‌شدگی کاهش می‌یابد و سبب بهبود و کاهش مقدار لایه‌لایه‌شدگی سوراخ می‌شود.

مقایسه سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری اولتراسونیک

در این بخش به بررسی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک بر پارامتر لایه‌لایه‌شدگی و علت تغییر این پارامتر بر اثر اعمال ارتعاش اولتراسونیک به ابزار، پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود با افزودن ارتعاش اولتراسونیک به ابزار، مقدار لایه‌لایه‌شدگی کاهش یافته است. همان طور که مشاهده شد با افزایش مقدار نیروی ماشین‌کاری مقدار لایه‌لایه‌شدگی نیز افزایش می‌یابد [40] و لایه‌لایه‌شدگی ارتباط نزدیکی با نیروی وارد شده به ابزار دارد، نیروی سوراخ‌کاری هنگام استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک، به طور موثر کاهش می‌یابد. دلیل اصلی کاهش نیروها هنگام استفاده از ارتعاش اولتراسونیک در ابزار چرخان، این است که در اثر اعمال ارتعاش به ابزار، تماس ابزار و قطعه کار هنگام ماشین‌کاری، منقطع بوده و نیروها به صورت دوره‌ای وارد می‌شوند و در نتیجه مقدار نیروها کاهش می‌یابد که می‌تواند به این دلایل باشد:

کاهش لایه‌لایه‌شدگی با افزایش درصد وزنی ذرات نانو را با توجه به رابطه مستقیم بین مفهوم تنش پسماند و لایه‌لایه‌شدگی نیز می‌توان تشریح کرد. در کامپوزیت‌ها، به دلیل تنوع در مواد مورد استفاده در فاز زمینه (مثل رزین پلیمری) و فاز تقویت‌کننده (الیاف شیشه یا کربن)، بعضی از خواص مکانیکی و حرارتی به شدت متفاوت بوده که تحت شرایط خاص مثل دمای بالا ممکن است مفید یا مضر باشد. یکی از مهم‌ترین خواصی که در کامپوزیت‌ها به خصوص در شرایط خستگی حرارتی مطرح است، ضریب انبساط حرارتی است که در راستاهای طولی و عرضی متفاوت است. این تفاوت، می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های پسماند حرارتی و در نتیجه افزایش امکان وقوع لایه‌لایه‌شدگی شود. افزودن ذرات نانو، با پرکردن ترک‌های سطحی و فضاهای خالی باعث نزدیک‌شدن خواص فاز زمینه به فاز تقویت‌کننده و کاهش اختلاف ضریب انبساط حرارتی می‌شود. در نتیجه، با کاهش تنش، تورق نیز کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با افزودن ۵٪ ذرات نانولوله کربنی چندجداره، میزان لایه‌لایه‌شدگی تا بیش از ۱۳٪ کاهش می‌یابد. تصاویر ثبت‌شده از سوراخ‌های ایجادشده در نمونه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی در شکل ۷ ارائه شده است.

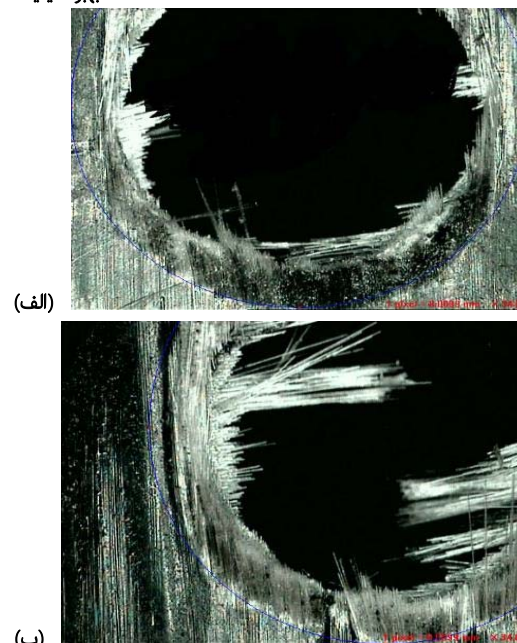


شکل ۷) مقایسه کیفیت سوراخ در سوراخ‌کاری اولتراسونیک و سرعت برشی ۳۵ متر بر دقیقه در حالت: (الف) بدون نانولوله چندجداره کربنی، (ب) ۵٪ نانولوله چندجداره کربنی

مقایسه کیفیت سوراخ در این نمونه‌ها تاییدی بر نتایج به‌دست‌آمده از رابطه ۱ است. مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تقویت‌شده با ذرات نانو، کیفیت سوراخ‌کاری بسیار افزایش یافته است.

تاثیر چیدمان لایه‌ها

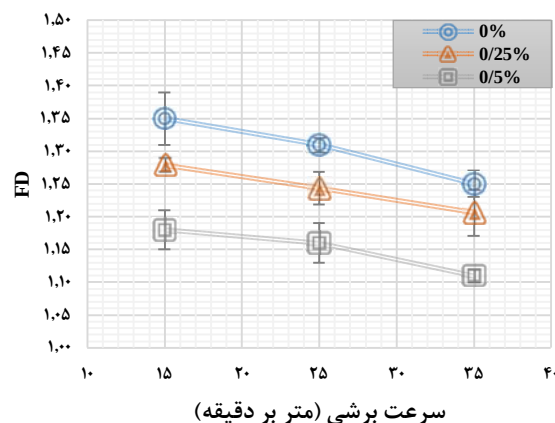
به‌عنوان سومین پارامتر موثر بر ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی تحت چرخه حرارتی، نحوه آرایش لایه‌ها در هنگام ساخت یک سازه



شکل ۶) مقایسه کیفیت سوراخ: (الف) سوراخ‌کاری معمولی، (ب) سوراخ‌کاری اولتراسونیک در سرعت برشی ۳۵ متر بر دقیقه

تاثیر افزودن ذرات نانولوله کربنی چندجداره

مطابق با آنچه در نمودار ۴ ارائه شده، نتایج تجربی نشان می‌دهد که کیفیت ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی به‌صورت چشمگیری تحت تاثیر میزان ذرات نانولوله کربنی چندجداره استفاده شده در فاز زمینه است. مشاهده می‌شود که لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های کامپوزیتی (بدون ذرات نانو) با افزایش سرعت برشی به‌صورت خطی کاهش می‌یابد در حالی که در نمونه‌های نانوکامپوزیتی (دارای ذرات نانو)، کاهش میزان لایه‌لایه‌شدگی تقریباً به‌صورت غیرخطی است. مقایسه سه حالت مختلف ارائه‌شده در نمودار زیر نشان می‌دهد که با افزودن مقدار مناسبی از ذرات نانو، می‌توان کیفیت ماشین‌کاری قطعات کامپوزیتی را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. در واقع افزودن ذرات نانو منجر به کاهش ترک‌های سطحی شده است که احتمال پدیده جدایش لایه‌ها در حین ماشین‌کاری را کاهش می‌دهد.



نمودار ۴) مقایسه لایه‌لایه‌شدگی در درصد‌های وزنی متفاوت نانولوله چندجداره کربنی

فرآیند ماشین‌کاری"، "افزودن ذرات نانو" و "نوع چیدمان لایه‌ها" مورد مطالعه قرار گرفت.

مقایسه دو فرآیند ماشین‌کاری ساده و ماشین‌کاری مافوق صوت دوار سوراخ‌کاری اولتراسونیک نشان داد که میزان لایه‌لایه‌شدگی حداکثر تا بیش از ۱۰٪ کاهش یافته است که می‌تواند به علت کاهش نیروی وارده به قطعه کار در حین فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک باشد.

بررسی تاثیر افزودن ذرات نانو به مواد کامپوزیتی نشان داد که با افزودن مقدار مناسبی از ذرات نانولوله کربنی چندجداره، می‌توان کیفیت ماشین‌کاری قطعات کامپوزیتی را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. افزودن ذرات نانو منجر به کاهش ترک‌های سطحی شده که احتمال پدیده جدایش لایه‌ها در حین ماشین‌کاری را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزودن ۵٪ ذرات نانولوله کربنی چندجداره، میزان لایه‌لایه‌شدگی تا بیش از ۱۳٪ بهبود می‌یابد.

نحوه آرایش لایه‌ها در یک سازه کامپوزیتی چندلایه به‌عنوان سومین پارامتر موثر بر ماشین‌کاری مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه میزان لایه‌لایه‌شدگی نمونه‌های با چیدمان متقارن و نامتقارن هشت‌لایه (با ضخامت یکسان) نشان داد که نمونه‌های متقارن، لایه‌لایه‌شدگی کمتری را تحت فرآیند ماشین‌کاری تجربه کرده‌اند. همچنین میزان تفاوت لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های متقارن و نامتقارن در سرعت برشی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه بسیار محسوس‌تر از سرعت‌های دیگر است. نتایج تجربی نشان داد که با تغییر چیدمان لایه‌ها از نامتقارن به متقارن، کیفیت ماشین‌کاری تا ۱۴٪ افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است. **تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

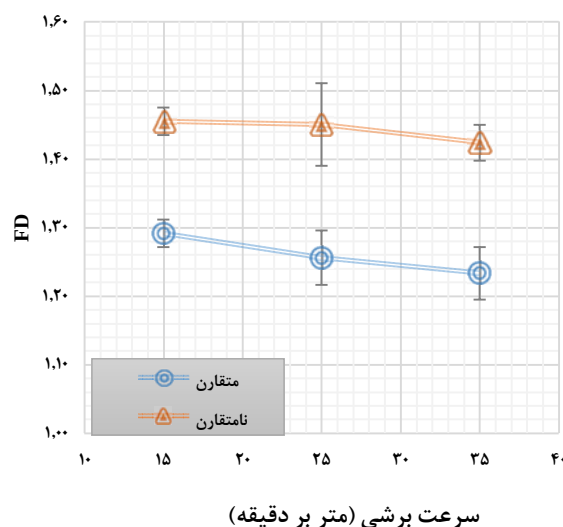
سهم نویسندگان: محمد براهنی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ علی طباطباییان (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ احمدرضا قاسمی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ سعید امینی، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Baraheni M, Shelesh-Nezhad K, Miralami A, Adli AR, Hashemi-Soudmand B. Experimental studies on morphology and impact behavior of PA6/ABS/CaCO₃ nanocomposites. *Journal of Science and Technology of Composites (JSTC)*. 2016;3(1):43-49. [Persian]
- 2- Hakimi E, Amini S. Study of delamination in the process helical milling of carbon fiber-reinforced polymer composite. *Journal of Science and Technology of Composites (JSTC)*. 2016;2(4):51-58. [Persian]

کامپوزیتی در این بخش مطالعه می‌شود. نمودار ۵ میزان لایه‌لایه‌شدگی نمونه‌های با چیدمان متقارن و نامتقارن هشت‌لایه (با ضخامت یکسان) را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه‌های متقارن، لایه‌لایه‌شدگی کمتری را تحت فرآیند ماشین‌کاری تجربه کرده‌اند. همچنین میزان تفاوت لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های متقارن و نامتقارن در سرعت برشی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه بسیار محسوس‌تر از سرعت‌های دیگر است. دلیل کیفیت پایین‌تر ماشین‌کاری در نمونه‌های با چیدمان نامتقارن را می‌توان با توجه به انحنای ایجادشده در این نمونه‌ها، که پس از فرآیند پخت به وجود می‌آید، بررسی کرد. انحنای نمونه‌های نامتقارن باعث افزایش خاصیت خمشی سازه شده است و زمینه لایه‌لایه‌شدگی را فراهم می‌سازد^[45]. همچنین، مطالعات انجام‌شده در زمینه تحلیل تنش پسماند کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که در چیدمان متقارن به دلیل اختلاف نسبتاً کم بین ضریب انبساط حرارتی لایه‌های مختلف، تنش پسماند کمتری در مقایسه با حالت نامتقارن ایجاد می‌شود^[46]. در نتیجه، لایه‌لایه‌شدگی نیز کمتر رخ داده و کیفیت ماشین‌کاری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با تغییر چیدمان لایه‌ها از نامتقارن به متقارن، کیفیت ماشین‌کاری تا ۱۴٪ افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با نزدیک‌شدن خواص لایه‌های مختلف یک سازه کامپوزیتی چندلایه، کیفیت ماشین‌کاری بهبود می‌یابد.



نمودار ۵) مقایسه لایه‌لایه‌شدگی با چیدمان متقارن و نامتقارن

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی به روش چیدمان دستی ساخته شده‌اند و سپس تحت شرایط خستگی حرارتی قرار داده شدند. بررسی لایه‌لایه‌شدگی نمونه‌هایی که تحت شرایط خستگی حرارتی بودند نشان داد که کیفیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها با قرارگیری در چرخه حرارتی به شدت کاهش می‌یابد. به‌منظور کاهش تاثیر مخرب خستگی حرارتی بر کیفیت ماشین‌کاری قطعات کامپوزیتی، سه عامل مختلف شامل "نوع

- 20- Chern G-L, Lee H-J. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006;27(7-8):688-692.
- 21- Chang SS, Bone GM. Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6. *Precision Engineering*. 2010;34(3):369-375.
- 22- Neugebauer R, Stoll A. Ultrasonic application in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;149(1-3):633-639.
- 23- Liu D, Tang Y, Cong W. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite structures*. 2012;94(4):1265-1279.
- 24- 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):252-259.
- 25- Wang H, Sun J, Li J, Li W. Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;74(1-4):257-266.
- 26- Phadnis VA, Makhdum F, Roy A, Silberschmidt VV. Experimental and numerical investigations in conventional and ultrasonically assisted drilling of CFRP laminate. *Procedia Cirp*. 2012;1:455-459.
- 27- 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):1403-1416.
- 28- Mohamed M, Taheri F. Influence of graphene nanoplatelets (GNPs) on mode I fracture toughness of an epoxy adhesive under thermal fatigue. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2017;31(19-20):2105-2123.
- 29- Ghasemi A, Tabatabaeian A, Moradi M. Residual stress and failure analyses of polymer matrix composites considering thermal cycling and temperature effects based on classical laminate plate theory. *Journal of Composite Materials*. 2018;53(21):1-7.
- 30- Ghasemi AR, Tabatabaeian A, Asghari B. Application of slitting method to characterize the effects of thermal fatigue, lay-up arrangement and MWCNTs on the residual stresses of laminated composites. *Mechanics of Materials*. 2019;134:185-192.
- 31- Tabatabaeian A, Ghasemi AR. Curvature changes and weight loss of polymeric nano-composite plates with consideration of the thermal cycle fatigue effects and different resin types: an experimental approach. *Mechanics of Materials*. 2019;131:69-77.
- 32- Heidari-Rarani M, Aliha M, Shokrieh M, Ayatollahi M. Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings-An experimental study. *Construction and Building Materials*. 2014;64:308-315.
- 33- Singh RP, Singhal S. Rotary ultrasonic machining: A review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016;31(14):1795-1824.
- 34- Tsao C, Hocheng H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;203(1-3):342-348.
- 35- Feito N, Díaz-Álvarez J, Díaz-Álvarez A, Cantero J, Miguélez M. Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs. *Materials*. 2014;7(6):4258-71.
- 36- Amini S, Baraheni M, Moeini Afzal M. Statistical study of the effect of various machining parameters on
- 3- Baraheni M, Amini S. Effects of machining parameters on delamination in drilling of GFRP composites. *The 13th Conference of Producing and Manufacturing engineering*. Hormozgan: Faculty of Engineering, University of Hormozgan; 2016. [Persian]
- 4- Asghari B, Ghasemi AR, Tabatabaeian A. On the optimal design of manufacturing-induced residual stresses in filament wound carbon fiber composite cylindrical shells reinforced with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*. 2019;182:107743.
- 5- Sheikh-Ahmad JY. *Machining of polymer composites*. Verlag US: Springer; 2009.
- 6- Spur G, Lachmund U, Jahanmir S, Ramulu M, Koshy P. Turning of fiber-reinforced plastics, machining of ceramics and composites. In: Jahanmir S. *Machining of Ceramics and Composites*. New York: CRC Press; 1999. pp. 209-248.
- 7- Masuda M, Kuroshima Y, Chujo Y. Failure of tungsten carbide-cobalt alloy tools in machining of carbon materials. *Wear*. 1993;169(2):135-40.
- 8- Abrao AM, Faria PE, Rubio JC, Reis P, Davim JP. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;186(1-3):1-7.
- 9- 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.
- 10- Amini S, Baraheni M, Hakimi E. Enhancing dimensional accuracy and surface integrity by helical milling of carbon fiber reinforced polymers. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2019;2(4):362-372.
- 11- Knight WA, Boothroyd G. *Fundamentals of metal machining and machine tools*. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2005.
- 12- 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):141-150.
- 13- Baraheni M, Amini S. Predicting subsurface damage in silicon nitride ceramics subjected to rotary ultrasonic assisted face grinding. *Ceramics International*. 2019;45(8):10086-10096.
- 14- Baraheni M, Amini S. Comprehensive optimization of process parameters in rotary ultrasonic drilling of CFRP aimed at minimizing delamination. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2019;2(4):379-387.
- 15- Amini S, Nazari F, Baraheni M, Ghasemi AH. Investigating the effect of rotation speed and ultrasonic vibrations in the incremental forming process. *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*. 2018;11(4):91-97. [Persian]
- 16- Amini S, Paktinat H, Barani A, Tehran AF. Vibration drilling of Al2024-T6. *Materials and Manufacturing Processes*. 2013;28(4):476-480.
- 17- Azarhoushang B, Akbari J. Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(7-8):1027-1033.
- 18- Pujana J, Rivero A, Celaya A, De Lacalle LL. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009;49(6):500-508.
- 19- Ma CX, Shamoto E, Moriwaki T. Drilling assisted by ultrasonic elliptical vibration. *Key Engineering Materials*. 2005;291-292:443-446.

Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2018;232(5):540-554.

42- Brehl D, Dow T. Review of vibration-assisted machining. Precision Engineering. 2008;32(3):153-172.

43- Cong W, Pei ZJ, Treadwell C. Preliminary study on rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks. Ultrasonics. 2014;54(6):1594-1602.

44- Khashaba U. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. Composite Structures. 2004;63(3-4):313-327.

45- Tabatabaeian A, Ghasemi AR. Curvature changes and weight loss of polymeric nano-composite plates with consideration of the thermal cycle fatigue effects and different resin types: An experimental approach. Mechanics of Materials. 2019;131:69-77.

46- Akbari S, Taheri-Behrooz F, Shokrieh M. Characterization of residual stresses in a thin-walled filament wound carbon/epoxy ring using incremental hole drilling method. Composites Science and Technology. 2014;94:8-15.

delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. Journal of Science and Technology of Composites. 2018;5(1):41-50.

37- Tabatabaeian A, Ghasemi AR, Asghari B. Specification of non-uniform residual stresses and tensile characteristic in laminated composite materials exposed to simulated space environment. Polymer Testing. 2019;80:106147.

38- Razfar M. Machining and tool principles. Tehran: Amirkabir University; 2011. pp. 185-205. [Persian]

39- Unknown Author. Machining and cutting tools. Kashan: Kashan University; 2013. [Persian]

40- Baraheni M, Amini S. Study of the effect of machining parameters on delamination in rotary ultrasonic machining process of glass fiber reinforced polymer composite by diamond core tool. Journal of Science and Technology of Composites. 2017;4(1):67-73. [Persian]

41- Amini S, Baraheni M, Mardiha A. Parametric investigation of rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced plastics. Proceedings of the Institution of