

بررسی سوراخکاری کامپوزیت‌ها با دریل

محمد خوران*

مری مجتبع آموزش عالی اسفراین
mokhoran@gmail.com

حسین امیرآبادی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند
hamirabadi@birjand.ac.ir

حبيب‌الله صفری

استادیار مجتبع آموزش عالی اسفراین، اسفراین
safari@esfarayen.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۴

چکیده

استفاده روزافزون کامپوزیت‌ها و مزایای فراوانی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا نسبت به خوردگی و خستگی، عدم رسانایی الکتریکی، وجود روش‌های متنوع ساخت و امکان تولید شکل‌های پیچیده و متنوع باعث شده است تا تحقیقات زیادی درباره این دسته از مواد انجام شود. معمولاً قطعات کامپوزیتی برای اتصالات مکانیکی به سوراخکاری نیاز دارند. ماشینکاری کامپوزیت‌ها به دلیل ناهمسانگردی، غیرهمگنی و ذرات مقاومت‌دهنده کامپوزیت، که ساینده ابزار می‌باشند، سخت است. عملیات سوراخکاری یکی از فرایندهای سنتی ماشینکاری مواد است که معمولاً عیوبی چون تورق، ترک خوردگی زمینه (ماتریس)، الیاف برش نخورده و جز این‌ها را به‌هنگام ماشینکاری کامپوزیت‌ها به‌همراه دارد. این معایب تأثیر بسزایی بر کیفیت و استحکام قطعه نهایی دارند؛ بنابراین لزوم پژوهش بیشتر در اینباره بیش از پیش احساس می‌شود. در این مقاله سوراخکاری کامپوزیت‌ها و پارامترهای تأثیرگذار و آخرین پیشرفت‌های این حوزه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در خلال مقاله نیز فرصت‌ها و موقعیت‌های به‌کارگیری فرایند ذکر می‌گردد.

واژگان کلیدی: کامپوزیت، سوراخکاری، تورق، الیاف برش‌نخورده

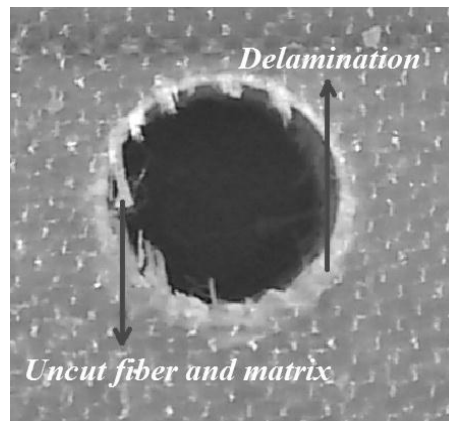
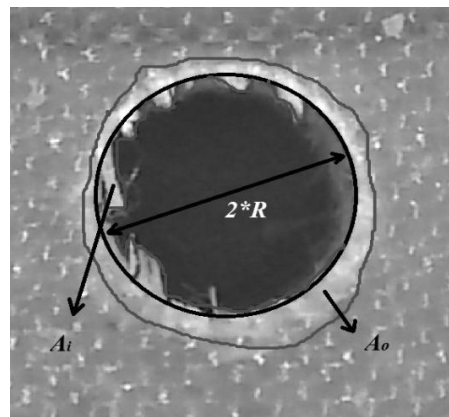
۱. مقدمه

دارد. یکی از اصلی‌ترین معایب مرسوم حین سوراخکاری قطعات کامپوزیتی وجود پدیده تورق^۱ و برش نخوردن الیاف^۲ می‌باشد (شکل ۱). این معایب تأثیر بسزایی بر کیفیت و استحکام قطعه نهایی دارند که اخیراً توجه پژوهشگران را به‌خود معطوف کرده‌اند. کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای با رزین اپوکسی بیش از ۵۰ درصد از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سوراخکاری را به‌علت کاربرد و اهمیت

سوراخکاری نوعی فرایند ماشینکاری سنتی است که با استفاده از ابزاری به نام مته، سوراخی با مقطع دایره‌ای (برابر با قطر مته) روی قطعات فلزی و غیرفلزی ایجاد می‌کند. سوراخکاری کامپوزیت‌ها با مخاطراتی همراه است و صدمات و خرابی‌های متعددی دارد. آسیب‌های متنوعی در فرایند سوراخکاری مواد کامپوزیتی از جمله ترک خوردگی ماتریس، خروج الیاف، الیاف برش‌نخورده و تورق وجود



بالایش تشکیل می‌دهند. همچنین الیاف بافته‌شده^۳ در میان سایر الیاف بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. آمارها نشان می‌دهد در صنایع هوایی ایالات متحده علت رد شدن ۶۰ درصد قطعات کامپوزیتی پلیمری، این خرابی‌ها می‌باشد. چون عملیات سوراخکاری معمولاً به‌منظور هم‌بندی قطعات کامپوزیتی به‌کار گرفته می‌شود و جزء آخرین مراحل فرایندهای ساخت و تولید می‌باشد، وقوع این خرابی سهم زیادی از هزینه‌های این صنعت را به‌خود اختصاص داده است و ارائه روش‌هایی جهت جلوگیری از این عیوب، می‌تواند راه‌حلی مفید برای کاهش هزینه‌های سربار تولید باشد.



شکل ۱. نواحی مختلف تورق و الیاف برش‌خورده [۲۸]

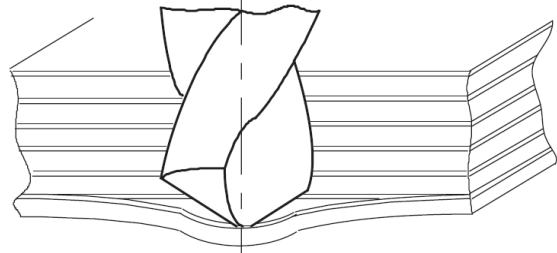
۲. کامپوزیت

اصطلاح ماده کامپوزیت، به‌معنای ماده تشکیل‌شده از دو یا چند فاز یا قسمت مختلف است و معادل فارسی آن واژه

ماده مرکب است. به‌عبارت دیگر اگر فازهای تشکیل‌دهنده موجود هرکدام دارای خواص فیزیکی کاملاً متفاوت بوده، اما ماده تشکیل‌شده از آنها دارای خواصی کاملاً متفاوت با هر یک از فازهای اولیه باشد، در این‌صورت به آن ماده مرکب گفته می‌شود. مواد مرکب، از موادی به فرم بافت، الیاف، فوم و مواد لانه‌زنبوری که توسط یک زمینه (ماتریس) یا رزین (چسب) به هم متصل شده‌اند، ساخته می‌شوند. مواد کامپوزیتی به‌صورت ذاتی در ابعاد ماکروسکوپیک ناهمسانگرد^۴ می‌باشند. در یک کامپوزیت به‌طور کلی الیاف عضو بارپذیر اصلی سازه است، در حالی که ماتریس آنها را در محل و آرایش مطلوب نگاه داشته و به‌عنوان یک محیط منتقل‌کننده بار بین الیاف عمل می‌کند؛ همچنین آنها را از صدمات محیطی در اثر بالارفتن دما و رطوبت حفظ می‌کند.

قدیمی‌ترین استفاده انسان از کامپوزیت‌ها به مصر قدیم بازمی‌گردد که در آنجا از کاه برای تقویت گچ و ساختن آجر برای ایجاد بناها استفاده می‌کردند. تنورهایی که از گل و پشم بز ساخته می‌شدند و امروزه در نواحی مختلف کشور یافت می‌شوند نیز از جمله کامپوزیت‌های نخستین‌اند. سال‌های ۱۹۳۴ و ۱۹۳۶ م، را شروع کامپوزیت‌های مدرن می‌شناسند. در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ م، بافت الیاف شیشه به‌همراه رزین پلی‌استر برای تولید اجزای کاهنده مقاومت هوا، محفظه رادار و اجزای غیرفلزی هواپیما به‌کار می‌روند. در دهه ۱۹۵۰ م، رزین اپوکسی ارائه و به‌طرز موفق‌آمیزی با مواد تقویت‌کننده الیاف شیشه استفاده شد. با ارائه کربن / گرافیت به‌عنوان ماده تقویتی در اوائل دهه ۱۹۶۰ تحولی نو در کاربرد مواد مرکب پدید آمد. کامپوزیت‌های کربن / گرافیت اکنون از مواد پیشرفته متداول می‌باشند. کولار نخستین‌بار در دهه ۱۹۷۰ م تولید شد و امروزه کاربردهای گسترده‌ای در بسیاری از هواپیماها پیدا کرده است. هم‌زمان با پیشرفت مواد تقویت‌کننده، مواد شیمیایی متصل‌کننده (چسب‌ها) نیز برای ایجاد ماتریس‌های با ویژگی‌های مناسب‌تر، پیشرفت و بهبود

یافته‌اند [۱]. مواد مرکب بر دو اساس تقسیم‌بندی می‌شود: یکی شکل ماده تقویت‌کننده و دیگری چگونگی توزیع یا قرارگرفتن آنها در زمینه پلیمری. لذا بر این اساس به دو گروه عمده مواد مرکب ذره‌ای (تقویت‌شده با ذرات) و مواد مرکب لیفی (تقویت‌شده با الیاف) تقسیم می‌شوند [۲].



شکل ۲. نمایی شماتیک از سوراخکاری در مواد کامپوزیتی

کامپوزیت‌ها مزایای فراوانی دارند که از آن جمله می‌توان به نسبت استحکام به وزن بالا (حتی تا ۱۵ برابر برخی از فولادها)، مقاومت بالا نسبت به خوردگی و وجود روش‌های مختلف ساخت و امکان تولید شکل‌های پیچیده و متنوع اشاره کرد. البته در کنار مزایای فراوان، باید به معایب آنها نیز توجه شود. اگرچه این مواد در تمام کاربردها به جز در مورد تفرانس حرارتی بر سایر مواد مهندسی برتری دارند، اما هزینه بالای مواد اولیه، کمبود دانش و تجربه و ساخت مشکل از معایب آنها به‌شمار می‌رود. در جدول ۱ مزایا و معایب استفاده از کامپوزیت‌ها ذکر شده است.

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته است. این کاربردها از صنایع بسیار پیشرفته و پیچیده گرفته تا ساخت لوازم و وسائل بسیار ساده را دربر می‌گیرد. در نظرگرفتن فاکتورها و عواملی چون صرفه‌جویی در مصرف انرژی و مواد، سبکی وزن و وسائل نقلیه، هواپیمایها، مصرف انرژی کمتر در تولید مواد اولیه و قطعات، عایق‌بندی حرارتی ساختمان‌ها و سازه‌ها، مقاومت مناسب در برابر بسیاری از مواد شیمیایی، استحکام کششی خوب و جز این‌ها روزبه‌روز اهمیت استفاده از مواد مرکب را بیشتر نشان می‌دهد.

۳. سازوکار تورق ناشی از مته‌های گوناگون

در سوراخکاری کامپوزیت، ممکن است لایه‌های پایینی از اتصال بین لایه‌های خود در اطراف سوراخ جدا شود. شکل ۲ مدلی از سوراخکاری در مواد کامپوزیتی را به تصویر می‌کشد. تورق به زبان ساده جداشدن لایه‌ها از هم می‌باشد که دارای دو نوع کلی (در فرایند سوراخکاری) می‌باشد:

۱. بیرون‌زدن الیاف حین ورود مته به درون قطعه
۲. خروج الیاف در هنگام خروج مته از طرف دیگر قطعه

با انتشار لایه‌لایه شدن، کار انجام‌شده توسط نیروی محوری F_A با حرکت مته مرتبط بوده که صرف تغییر شکل ورق و همچنین انتشار ترک بین لایه‌های می‌شود. معادله تعادل انرژی به صورت ۱ به‌دست می‌آید:

$$G_{IC}dA = F_A dX - dU \quad (1)$$

به‌طوری‌که در این رابطه dU انرژی کرنشی بی‌نهایت کوچک است، dA افزایش سطح ترک لایه‌لایه شدگی است و G_{IC} انرژی انتشار ترک بحرانی در واحد سطح در مود I می‌باشد. در شکل ۳، مرکز صفحه دایره‌ای توسط یک مته پیچشی^۵ با قطر d تحت بار قرار گرفته است. در این شکل، F_A نیروی محوری است، X جابه‌جایی، H ضخامت قطعه‌کار، h عمق برش‌نخورده در زیر ابزار و a شعاع تورق می‌باشد. فرض شده رفتار ایزوتروپیک و خمشی خالص باشد. نیروی محوری در زمان انتشار ترک توسط مته پیچشی به صورت ۲ محاسبه می‌شود:

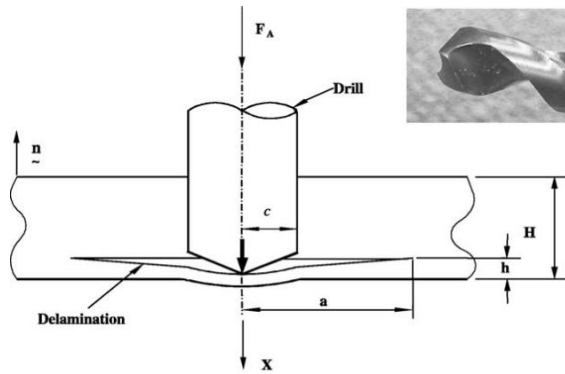
$$F_A = \pi \sqrt{32G_{IC}M} = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

به‌طوری‌که در این رابطه M صلبیت خمشی الیاف تقویت‌کننده، E مدول یانگ، و ν ضریب پواسون مواد می‌باشند. برای جلوگیری از لایه‌لایه شدگی، نیروی محوری اعمال‌شده نباید از این مقدار تجاوز کند، که تابعی از خواص مواد و ضخامت برش‌نخورده می‌باشد.

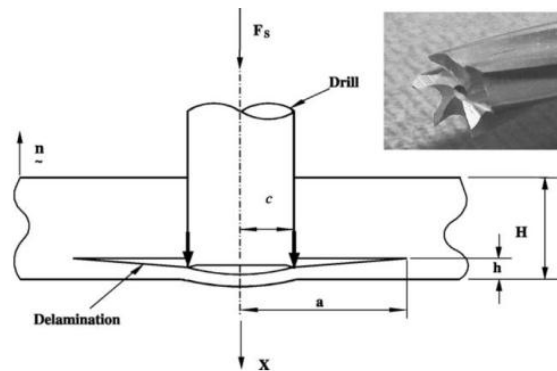
$$M = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

جدول ۱. مزایا و معایب کامپوزیت‌ها [۳]

معایب	مزایا
هزینه مواد	وزن سبک
عدم وجود قوانین طراحی مدون	سختی بالا
طراحی انجام‌شده فلز و کامپوزیت به‌ندرت قابل تعویض با یکدیگرند	استحکام بالا
خطرات حلال و رطوبت	ناهمسانگرد
زمان توسعه طولانی	ساخت آسان شکل‌های پیچیده
مشکلات ساخت و تولید (دستی، کند، مشکلات زیست محیطی و تکرارپذیری)	یکپارچگی قطعات که منجر به هزینه کلی پایین سیستم می‌گردد
چکش‌خواری پایین (افزایش تنش نسبت به فلزات بحرانی‌تر)	آسانی اتصال
بازه استقامت حرارتی	مقاومت خستگی و میرایی خوب
خرابی‌های پنهان	مقاومت در مقابل شکست
	قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی داخلی
	انبساط حرارتی و انتقال حرارتی پایین
	رسانایی الکتریکی کم



شکل ۳. مدل صفحه دایروی برای آنالیز تورق مت‌پیشی [۷]



شکل ۴. مدل صفحه دایروی برای آنالیز تورق مت‌اره [۸]

۳-۱. مته اره^۶

$$F_R = \pi \sqrt{\frac{32G_{IC}M}{1 - K_1s^2 + K_2s^4}} \quad (5)$$

به طوری که در این رابطه t ضخامت مته و $\beta = T/C$ نسبت هسته بین ضخامت و شعاع مته می باشد.

$$K_1 = \left(2 - 2\beta + \frac{3\beta^2}{2}\right) + \frac{4(1-\beta)^2}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta)$$

$$K_2 = \frac{2 - 4\beta + 5\beta^2 - 3\beta^3 + \beta^4}{2} + \frac{2(1-\beta)^2(2-2\beta+\beta^2)}{\beta(2-\beta)} \ln(1-\beta) \quad (6)$$

۳-۴. گرد تراش مرکزدار^۹

شکل ۷ شماتیک گرد تراش مرکزدار و تورق ناشی از آن را نشان می دهد. مته هسته - مرکز را می توان با برهم نهی مته پیچشی و مرکز بیان کرد. نیروی محوری در مته هسته - مرکز (F_{CC}) در شروع انتشار ترک را می توان به شرح زیر بدست آورد:

$$F_{cc} = \pi(1+\gamma) \sqrt{\frac{32G_{IC}M}{1+\gamma^2(1-K_1s^2+K_2s^4)}} \quad (7)$$

به طوری که در این رابطه γ نسبت نیرو بین نیروی متمرکز مرکزی F_A و نیروی حلقوی F_R می باشد.

۳-۵. گرد تراش اره^{۱۰}

شکل ۸ نمای شماتیک مته گرد تراش اره و تورق ناشی از آن را نمایش می دهد. در این شکل c^* شعاع داخلی مته هسته، b_s شعاع مته اره، t^* فاصله بین c^* و b_s و φ نسبت بین t^* و شعاع مته هسته است. نیروی محوری مته هسته - اره (F_{CS}) را می توان به صورت یک بار محیطی دایروی (F_S) به علاوه یک بار حلقوی (F_R) در نظر گرفت. با استفاده از روش برهم نهی، نیروی محوری F_{CS} را می توان به شرح رابطه ۸ به دست آورد.

۴. پارامترهای سوراخکاری، پیشینه پژوهش

نیروی محوری و گشتاور پیچشی نوک ابزار مته به سرعت دورانی، پیشروی، هندسه ابزار و سایش ابزار بستگی دارد.

شکل ۴ یک مته اره و تورق ناشی از آن را به تصویر می کشد که در آن c شعاع مته است. با توجه به توزیع جانبی نیروی محوری به جای تمرکز در مرکز، این ابزار می تواند کیفیت ماشینکاری بهتری در سوراخکاری کامپوزیت ایجاد کند [۸]. نیروی محوری بحرانی در زمان شروع انتشار ترک برای مته اره به صورت ۳ محاسبه می شود.

$$F_s = \pi \sqrt{\frac{32G_{IC}M}{(1-2s^2+s^4)}} \quad (3)$$

به طوری که در این رابطه $s = c/a$ نسبت اندازه بین شعاع مته و شعاع لایه لایه شدگی (تورق) است.

۳-۲. مته چوب^۷

شکل ۵ نمایی شماتیک از مته چوب و تورق ناشی از آن را نشان می دهد. این مته به طور گسترده برای سوراخکاری مواد کامپوزیتی استفاده می شود [۸]. نیروی محوری مته چوب را می توان به صورت یک بار متمرکز در مرکز (P_1) به علاوه بار دایروی توزیع شده (P_2) در نظر گرفت. با استفاده از روش جمع آثار، نیروی محوری سوراخکاری با این ابزار در شروع انتشار ترک (F_C) را می توان به صورت ۴ محاسبه کرد:

$$F_s = \pi(1+\alpha) \sqrt{\frac{32G_{IC}M}{1+\alpha^2(1-2s^2+s^4)}} \quad (4)$$

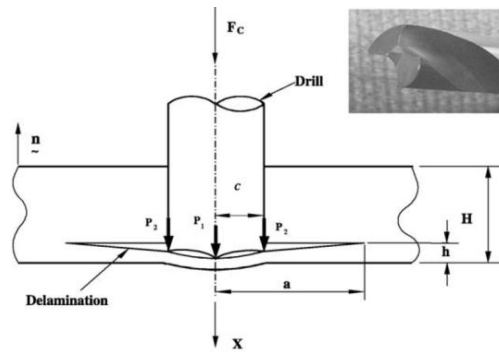
به طوری که در این رابطه α نسبت نیروی بین نیروی محیطی P_2 و نیروی مرکزی P_1 است.

۳-۳. مته هسته (گرد تراش)^۸

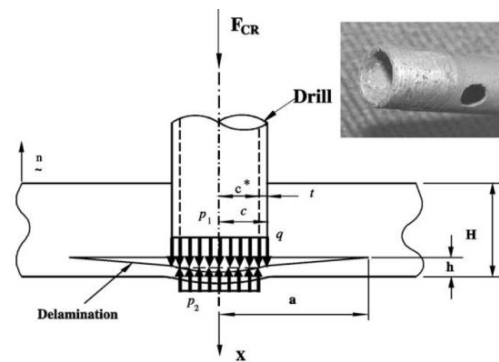
شکل ۶ شماتیک و تورق ناشی از آن را نمایش می دهد. تغییر شکل خارجی و داخلی صفحه دایروی به شعاع a که کلمپ شده، تحت بار توزیع شده دایروی روی یک ناحیه c قرار گرفته است. نیروی محوری در این ابزار (F_R) در شروع انتشار ترک به صورت ۵ می باشد [۹].



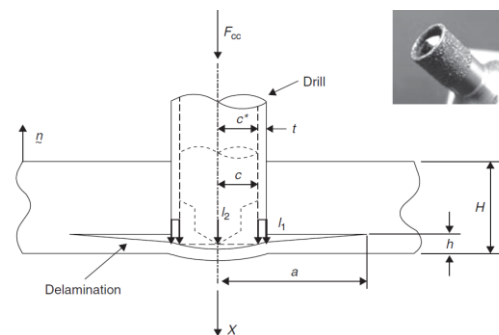
$$F_{cs} = \pi(1 + \lambda) \left(\frac{32G_{IC}M}{\lambda^2 + [1 - (K_1 + \lambda^2(1 - \beta - \phi))^2]s^2 + (K_2 + \lambda^2(1 - \beta - \phi^4))s^4} \right) \quad (8)$$



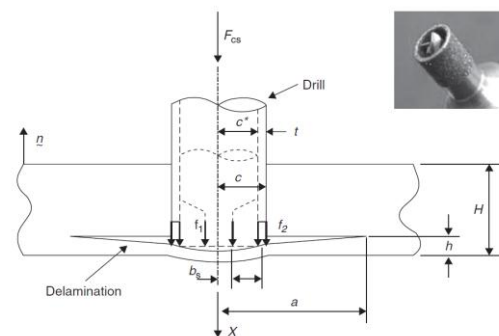
شکل ۵. مدل صفحه دایروی برای آنالیز تورق مته چوب [۷]



شکل ۶. مدل صفحه دایروی برای آنالیز تورق گرد تراش [۸]



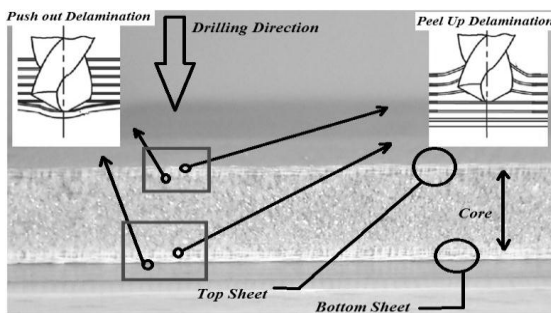
شکل ۷. مدل صفحه دایروی برای آنالیز تورق گرد تراش مرکزدار [۹]



شکل ۸. مدل صفحه دایروی برای آنالیز تورق گرد تراش ااره [۹]

مطالعه پیشینه پژوهش مربوط به سوراخکاری پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف نشان می‌دهد که کیفیت برش به‌شدت به پارامترهای سوراخکاری وابسته است [۸-۱۳]. مؤثرترین پارامتر نرخ پیشروی است و جدی‌ترین آسیب در اطراف خروجی سوراخ ایجاد می‌شود [۱۲]. استفاده از نرخ پیشروی بالاتر تنها زمانی ممکن است که دانش کافی در رابطه با نیروی محوری و تورق ناشی از هر نوع مته در دست باشد [۱۳]. علاوه بر این، یک ارتباط قوی بین افزایش سریع درجه حرارت برش و سرعت برشی وجود دارد که باعث سایش شدید ابزار می‌شود [۱۴]. اغلب برای انتخاب پارامترهای سوراخکاری بهینه بدون ایجاد آسیب از روش بهینه‌سازی چون سطوح پاسخ، تاکوچی و معیار بهینه‌سازی چندمنظوره استفاده می‌شود [۱۴-۱۸]. هونگ و همکارانش [۱۹] اثر هندسه مته‌های مختلف را به‌صورت تحلیلی بررسی کرده‌اند. آنها تورق در انواع مختلف مته را تجزیه و تحلیل کردند. بوسکو و همکارانش [۲۰] اثر پارامترهای برش بر تورق ناشی از سوراخکاری یک ساندویچ پنل با هسته فولادی و صفحات تقویت‌شده با الیاف شیشه را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. ساردیتاس و همکارانش [۲۱] یک روش بهینه‌سازی چندمنظوره (فاکتور تورق و نرخ باربرداری) را برای سوراخکاری ورق‌های کامپوزیتی لمینیت پیشنهاد دادند. تسائو و همکارانش [۲۲] روش نوینی برای کاهش تورق حین سوراخکاری مواد کامپوزیتی توسط نیروی پشتیبانی فعال ارائه کردند. روش پیشنهادی نشان می‌دهد که با نرخ تغذیه بالا می‌توان قطعات کامپوزیتی را با هزینه کم و تورق ناچیز سوراخکاری کرد. زایتون و همکارانش [۲۳] تأثیر پارامترهای گشتاور، نیروی محوری و کیفیت سطح را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب پارامترهای برش، می‌توان کیفیت سوراخ‌ها را بهبود بخشید. پلانی کومار [۲۴] روشی مؤثر برای بهینه‌سازی پارامترهای سوراخکاری بر اساس روش تاگوچی پیشنهاد داده است. سیگ و شارما [۲۵] یک مدل ریاضی

برای دستیابی به دینامیک فرایند سوراخکاری ارائه کرده‌اند. کلیکاپ [۲۶] تأثیر پارامترهای برش از قبیل سرعت، میزان تغذیه و زاویه نوک مته بر تورق را در عملیات سوراخکاری کامپوزیت‌های GFRP مورد بررسی قرار داده است. خوران و همکاران [۲۸] پدیده تورق و الیاف برش‌خورده را در پنل‌های ساندویچی مورد مطالعه قرار دادند. تورق در پنل‌های ساندویچی به دلیل داشتن ۲ ورق در بالا و پایین قطعه دارای ۴ ناحیه اصلی متأثر از این پدیده می‌باشد. در حالی که در سوراخکاری یک لمینیت دو منطقه وجود دارد. در پژوهش وی شرایط مختلف سوراخکاری (سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار برش)، در پنل‌های ساندویچی مختلف با هسته‌های مرکب از ورق موج‌دار و فوم پی. وی. سی، چوب بالسا، فوم پی. وی. سی. مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه شدند.



شکل ۹. سازوکار و نواحی تورق در کامپوزیت ساندویچی

پدیده تورق در هنگام ورود و خروج مته به‌داخل قطعه و به‌ویژه در لایه‌های بالایی و پایینی رخ می‌دهد. تورق در طول سوراخکاری لمینیت توسط دو سازوکار مختلف صورت می‌گیرد: پوسته‌ای شدن در لایه بالایی (کشیدن لایه به‌سمت بالا) و فشار (هل) دادن لایه پایینی [۲۷].

۵. نتیجه‌گیری

معمولاً قطعات کامپوزیتی برای اتصالات مکانیکی نیاز به سوراخکاری دارند. عملیات سوراخکاری یکی از فرایندهای ماشینکاری می‌باشد که عیوبی چون تورق، ترک‌خوردگی زمینه (ماتریس)، الیاف برش‌خورده و جز این‌ها را به‌هنگام

ماشینکاری کامپوزیت‌ها به‌همراه دارد. این عیوب تأثیر بسزایی در کیفیت و استحکام قطعه نهایی دارند و کم‌کردن عیوب اطراف سوراخ امری حیاتی می‌باشد. از مهمترین این عیوب فاکتور تورق و الیاف برش‌نخورده است که به‌طور کامل در این مقاله بحث شد. در سوراخکاری کامپوزیت پدیده تورق در خروجی سوراخ ناشی از نیروی پیشروی (نیروی محوری) می‌باشد که از طریق نوک مته به لایه‌های انتهایی هر پنل وارد می‌شود و الیاف برش‌نخورده نیز به دلیل کاهش ضخامت همراه با پیشروی مته، مقاومت قطعه در برابر نیروی محوری رفته‌رفته کاهش یافته که به پاره‌شدن الیاف منجر می‌شود (به‌جای برش الیاف). با توجه به مطالب بیان‌شده مهندسان به بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی برای رسیدن به کیفیت مطلوب تمایل دارند. با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش پارامترهای مانند سرعت برشی، میزان پیشروی، قطر مته حداکثر تأثیر را بر عیوب ماشینکاری داشته‌اند. نیروی تماسی بین ابزار و قطعه کار با افزایش قطر مته افزایش می‌یابد، اما نسبت نیرو به سطح

مقطع (فشار، تنش) کاهش می‌یابد که باعث کاهش آسیب وارده به الیاف و ماتریس می‌شود، بنابراین از میزان الیاف برش‌نخورده کاسته می‌شود.

در مقالات مشاهده شد که اکثر الیاف برش‌نخورده دارای یک حد بهینه‌اند. ابتدا با افزایش سرعت برشی و به دلیل نرم‌شدن فاز ماتریس، جدایش مواد راحت‌تر صورت می‌گیرد. در سرعت‌های بالاتر مته به دلیل کاهش زمان سوراخکاری و افزایش ارتعاشات عرضی ابزار تورق رشد آهسته‌ای خواهد داشت. این مورد بین کامپوزیت‌های ساندویچی رایج است در حالی که در سوراخکاری کامپوزیت‌های لمینیت، تورق با افزایش سرعت اسپیندل تمایل به کاهش دارد. با توجه مطالب مطرح‌شده می‌توان نتیجه گرفت که سوراخکاری آخرین فرایند تولید یک قطعه کامپوزیتی است و به اجبار برای اتصالات مکانیکی باید انجام پذیرد و قابل حذف نیست. اشکالات به‌وجود آمده حین ایجاد سوراخ نیز با کنترل دقیق فرایند قابل کنترل است.

۶. مآخذ

- [1] Vinson, J. R., R. L. Sierakowski. *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff, Dordrecht and The Netherlands, 1987.
- [2] Schwartz, M. M., *Composite Material Handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
- [3] George, L., *Handbook of Fiber Glass and Advanced Plastic-Composite*, 1982.
- [4] Jones, R. M., *Mechanic of Composite Materials*, McGraw-Hill Book Company, New York, 197.
- [5] Mallic, P. K., *Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Marcel Dekker, New York, 1988.
- [6] Jones, R. M., *Mechanic of Composite Materials*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975.
- [7] Hocheng H, C. C. Tsao. "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits." *J Mater Process Technol*.
- [8] Hocheng, H., C. C. Tsao. *A treatment of drilling-induced delamination of composite materials*, In: Davim JP, editor. *Drilling of composite materials*, New York: Nova Science Publishers; 2009, pp. 1-43.
- [9] Chen, W. C. "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates." *Int J Mach Tools Manuf* 1997, 37(8), pp. 1097-1108.



- [10] Komanduri, R, B. Zhang, C. M. Vissa. "Machining of fiber reinforced composites." *Proc Manuf Compos Mater* 1991, 49(27), pp. 1–36.
- [11] Davim, J. P., P. Reis. "Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study". *Mater Des* 2003; 24, pp. 315–324.
- [12] Kobayashi, A. *Machining of plastics*. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [13] Durao, L. M. P., D. J. S. Goncalves, J. M. R. S. Tavares, et al. "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates." *Compos Struct* 2010, 92, pp. 1545–1550.
- [14] Sakuma, K, M. Seto. "Tool wear in cutting glass fiber-reinforced plastic." *Bull JSME* 1981, 24(190), pp. 748–755.
- [15] Ugo Enemuoh, E., A. Sherif El-Gizawy, A. Chukwujekwu Okafor. "An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets." *Int J Mach Tools Manuf* 2001, 41 (12), pp. 1795–1814
- [16] Davim, J. P., P. Reis. "Study of delamination in drilling carbon fibre reinforced plastics (CFRP) using design experiments". *Compos Struct* 2003, 59: pp. 481–487.
- [17] Tsao, C. C., H. Hocheng. "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material." *Int J Mach Tools Manuf* 2004, 44(10), pp.1085–1090.
- [18] Mohan, N. S., S. M. Kulkarni, A. Ramachandra. "Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials." *Journal of Materials Processing Technology* 2007 (186), pp. 265–271.
- [19] Hocheng, H., C. C. Tsao. "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits." *Journal of Materials Processing Technology* 2003 (140), pp. 335–339.
- [20] Bosco, M. A. J., K. Palanikumar, B. Durga Prasad, A. Velayudham. "Influence of Machining Parameters on Delamination in Drilling of GFRP-armour Steel Sandwich Composites." *Procedia Engineering* Volume 51, 2013, pp. 758–763.
- [21] Sardiñas, R. Q., P. Reis, J. P. Davim. "Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms." *Composites Science and Technology* Volume 66, Issue 15, 1 December 2006, pp. 3083-3088.
- [22] Tsao, C. C., H. Hocheng, Y. C. Chen. "Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force." *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 61, Issue 1, 2012, pp. 91-94.
- [23] Zitoune, R., V. Krishnaraj, F. Collombet. "Study of drilling of composite material and aluminium stack." *Composite Structures*, Volume 92, Issue 5, April 2010, pp. 1246-1255.
- [24] Palanikumar, K. "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites." *Measurement*, Volume 44, Issue 10, December 2011, pp. 2138-2148.
- [25] Singh, A. P., M. Sharma. "Modelling of Thrust Force during Drilling of Fibre Reinforced Plastic Composites." *Procedia Engineering*, Volume 51, 2013, pp. 630-636.



- [26] Kilickap, E. "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite." *Expert Systems with Applications*, Volume 37, Issue 8, August 2010, pp. 6116-6122.
- [27] Mohan, N. S., S. M. Kulkarni, A. Ramachandra. "Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials." *Journal of Materials Processing Technology* 186, 2007, pp. 265–271.
- [28] Khoran, M., P. Ghabezi, M. Frahani, M. K. Besharati. "Investigation of drilling composite sandwich structures." *Int J Adv Manuf Technol* 2015, 76, pp. 1927–1936.

پی نوشت

-
1. delamination
 2. Uncut fiber
 3. woven
 4. anisotropic
 5. twist drill
 6. Saw Drill
 7. Candle Stick Drill
 8. Core Drill
 9. Core Center Drill
 10. Core-Saw Drill
 11. peeling up
 12. pushing out

