

## بررسی پارامترهای مختلف بر استحکام پیوند نانو کامپوزیت‌های Al-SiC<sub>p</sub> تهیه شده به روش نوردهی تجمعی پیوندی

صاحبعلی منافی\* و اعظم اسماعیلی

دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۰۷/۱۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

### چکیده

در این پژوهش، تاثیر مقدار ذرات تقویت کننده SiC<sub>p</sub> بر استحکام پیوند کامپوزیت‌های نانو ساختار Al-SiC<sub>p</sub> به روش نوردهی تجمعی پیوندی مورد بررسی قرار گرفت. برای تولید کامپوزیت‌های Al-SiC<sub>p</sub> به روش نوردهی تجمعی پیوندی (ARB) ابتدا ورقه‌هایی با ابعاد ۲۰۰×۵۰×۱ mm<sup>3</sup> بریده شدند و سپس این ورقه‌ها در کوره‌ای با دمای ۳۷۰ °C به مدت ۲ h آنیل شدند. فرآیند نوردهی تجمعی بر روی قطعه انجام شد. جهت بررسی اثر مقدار SiC<sub>p</sub> بر استحکام پیوند بین ورقه‌های آلومینیومی، مقدار SiC<sub>p</sub> ۰-۴ wt.% بین ورقه‌ها توزیع شد. نتایج نشان می‌دهند که حضور SiC<sub>p</sub> و افزایش مقدار آن‌ها باعث کاهش نسبی نیروی چسبندگی بین ورقه‌های آلومینیومی آزمایش شده می‌شود. SiC<sub>p</sub> مانع از اکستروژن شدن سطوح زیر از میان ترک‌های سطحی می‌شوند. هنگامی که میزان کاهش ضخامت کمتر از میزان آستانه‌ای باشد ترک‌های سطحی‌ای که در فصل مشترک دو فلز چه با حضور یا بدون حضور ذرات نانو SiC<sub>p</sub> ایجاد می‌شود کمتر بوده که این نکته باز هم باعث کمتر اکستروژن شدن ماده بکر زیرلایه‌ای و تماس کمتر آن‌ها با یکدیگر و عدم برقراری پیوند بین این دو ماده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** نانو کامپوزیت Al-SiC<sub>p</sub>، نوردهی تجمعی پیوندی، استحکام، ضخامت.

### ۱- مقدمه

(MMCs) ویژگی‌های آن مانند مدول الاستیک، استحکام، مقاومت سایشی و پایداری در دمای بالا را ارتقا می‌دهد. به دلیل این ویژگی‌های جالب کاربرد گسترده‌ای برای مواد کامپوزیتی پایه آلومینیوم مورد انتظار است [۱-۳]. کامپوزیت‌های Al-SiC<sub>p</sub> یک نوع جدید از کامپوزیت‌های زمینه فلزی است که از سال ۱۹۹۸ به‌طور گسترده‌ای مورد

امروزه آلومینیوم و آلیاژهای آن به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوایی و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اضافه کردن ذرات تقویت کننده سرامیکی از قبیل کاربیدها و اکسیدها به منظور ساختن کامپوزیت‌های زمینه فلزی

\* عهده‌دار مکاتبات: صاحبعلی منافی

نشانی: شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، پست الکترونیکی: a\_manafi@iau-shahrood.ac.ir

فشار بالا (TS). این روش‌ها دو نقطه ضعف مهم دارند. اولین نقطه ضعف این است که ماشین‌های شکل دادن با ظرفیت‌های نیروی بالا و قالب‌های گران‌قیمت نیاز دارند. دوم اینکه، تولید نسبتاً پایین است و مقدار مواد تولید شده بوسیله این روش‌ها محدود است [۱۳].

روش دیگر تغییر شکل پلاستیکی شدید روش نورد پیوندی-تجمعی (ARB) است [۱۴]. این روش تنها فرآیند تغییر شکل پلاستیکی شدید است که برای تولید مداوم و انبوه مواد حجم قابل استفاده است. این روش در سال ۱۹۹۸ به وسیله سایتو و همکارانش اختراع شد. در این روش می‌توان حجم مواد را به صورت فوق ریزدانه درآورد. ARB عملی‌ترین فرآیند تغییر شکل حجم برای تولید پیوسته ورق، صفحه و تسمه با ساختار فوق ریزدانه است [۱۵].

در سال‌های اخیر، ARB در ساخت کامپوزیت‌های چند لایه با مواد اولیه غیرمشابه مانند  $Al/Cu$  [۱۶]،  $Ti/Al$  [۱۷]،  $Al/Ni$  [۱۸]،  $Al/Mg$  [۱۹] و  $Ce/Al/Mg-Zn$  [۲۰] به کار رفته است. همچنین از آن برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی با ذرات تقویت کننده نظیر  $Al/Al_2O_3$  [۲۱]،  $Al/Al_2O_3/TiC$  [۲۲]،  $Cu/Al_2O_3$  [۲۳] و  $Al-SiC_p$  [۲۴] نیز استفاده شده است. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر میزان  $SiC_p$  بر استحکام پیوند کامپوزیت نانو ساختار آلومینیوم/کاربید سیلیسیم توسط فرآیند نورد پیوندی تجمعی است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- مواد و ترکیب شیمیایی

ورقه‌های آلومینیوم خالص تجاری که موازی با جهت نورد بریده شده بودند برای انجام این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. پس از برش، ورق‌ها در دمای  $370^\circ C$  به مدت ۲ ساعت تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی ورقه‌های آلومینیوم خالص تجاری توسط کوانتومتری پایه آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی ورقه‌های آلومینیومی استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

مطالعه قرار گرفته‌اند [۴،۵]. در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های  $Al-SiC_p$  برای مقابله با چالش مدیریت استحکام در سازه‌های پیشرفته دفاعی با توان رو به افزایش، مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۶].

ذرات  $SiC_p$  به دلیل خواص مکانیکی بالا شامل سختی بالا، صلیبت ضد سایش بالا در حین عملیات‌های سایشی نظیر الکتروود دستگاه‌های EDM و EDAD و هدایت الکتریکی پایین در مقایسه با آلومینیوم به عنوان ذرات تقویت کننده به کار می‌روند [۱]. آلومینیوم نیز به دلیل وزن سبک و قیمت مناسب و روش تولید تقریباً آسان آن به عنوان زمینه انتخاب شده است [۷] و با اضافه کردن ذرات تقویت کننده همچنان خواص مطلوب آن حفظ می‌شود [۸]. ذرات  $SiC_p$  دارای ضریب انبساط حرارتی (CTE) پایین هستند [۹]. بنابراین، ضریب انبساط حرارتی پایین و استحکام بالای کامپوزیت به وسیله مخلوط کردن فازهای فلزی و سرامیکی مناسب به دست می‌آید [۱۰]. روش‌های ساخت این مواد کامپوزیتی اغلب شامل ریخته‌گری، هم‌رسوبی، اکسیداسیون داخلی و متالورژی پودر می‌باشد. به دلیل قابلیت ترشوندگی ضعیف بین آلومینیوم و ذرات تقویت کننده و پراکندگی نامناسب، روش‌های ریخته‌گری غیرعملی هستند. روش‌های هم‌رسوبی و اکسیداسیون داخلی نیز برای تولید انبوه مناسب نیستند. در این بین، روش متالورژی پودر بهترین گزینه است [۱۱]، ولی آن هم دارای معایبی از قبیل فرآیند پیچیده، دمای کاری بالا، واکنش در فصل مشترک زمینه/تقویت کننده به صورت شدید، توزیع غیر یکنواخت فاز دوم و هزینه بالا می‌باشد [۸]. مواد فوق ریزدانه به روش‌های مختلفی نظیر انجماد سریع، رسوب بخار، آلیاژسازی مکانیکی، شکل دهی فلز برودتی و تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) تولید می‌شوند. روش تغییر شکل پلاستیکی شدید مناسب‌ترین روش برای تولید مواد فوق ریزدانه برای کاربردهای صنعتی است [۱۲].

روش‌های مختلفی برای تغییر شکل پلاستیکی شدید وجود دارد از جمله، متراکم کردن اکستروژن سیکلی (CEC)، فشار در کانال با زاویه یکسان (ECAP)، کرنش پیچشی تحت

جدول ۱: ترکیب شیمیایی ورقه‌های آلومینیوم اولیه (wt.%).

Sn (ppm)	۴/۷۷
Ni (ppm)	۶۳/۷۷
V	۰/۰۱۰
Sb	۰/۰۱۲
Mn	۰/۰۱۵
Ti	۰/۰۱۹
Si	۰/۰۴۳
Fe	۰/۲۴۵
Al	۹۹/۶۴۸

شعاع ۵۰ mm و قطر سیم ۰/۲۵ mm است، آماده‌سازی شدند. محققان ذکر کرده‌اند که برای جلوگیری از آلوده شدن دوباره سطوح باید از لمس کردن سطوح چربی‌زدایی و برسکاری شده پرهیز کرد زیرا لمس دوباره این سطوح باعث ایجاد آلودگی‌های سطحی بر روی آن‌ها می‌شود که مانع تشکیل پیوند قوی متالورژیکی بین ورقه‌ها است، از طرف دیگر برای پیشگیری از اکسیداسیون سطوح آماده‌سازی شده، فرآیند نورد پیوندی باید حتی الامکان در کمتر از ۱۲۰ ثانیه پس از آماده‌سازی سطحی انجام شود [۲۶].

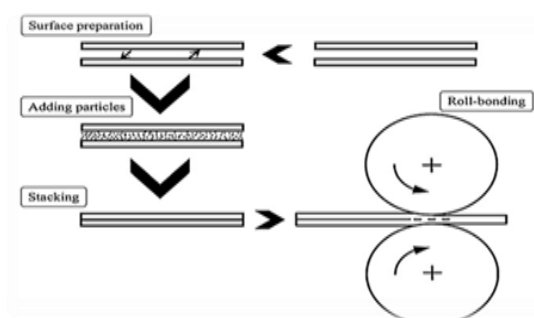
به منظور بررسی اثر نحوه توزیع بر استحکام پیوند ورقه‌ها دو روش مورد استفاده قرار گرفت. در اولین روش، ذرات  $\text{SiC}_p$  قبل از فرآیند نورد سرد پیوندی درون محلول استون ریخته و روی سطح ورق پاشیده می‌شوند. این روش عموماً برای بررسی تاثیر مقدار  $\text{SiC}_p$  استفاده شده است. روش دوم برای توزیع  $\text{SiC}_p$ ، آماده‌سازی سوسپانسیونی از  $\text{SiC}_p$  با  $\text{pH}=7$  است، سپس این سوسپانسیون که مخلوطی از ذرات  $\text{SiC}_p$  در استون، اسید نیتریک و اسید سولفوریک است به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک در حمام اولتراسونیک قرار می‌گیرد و بعد از آن، محلول روی سطح ورق توزیع خواهد شد. پس از اعمال محلول، به منظور تخییر بخش مایع سوسپانسیون، گرمایش ملایمی در دمای  $50^\circ\text{C}$  و به مدت ۳۰ دقیقه توسط یک گرم کننده برقی به ورقه اعمال می‌شود. این روش توزیع در این پژوهش به عنوان روش توزیع محلولی (SD) نام برده خواهد شد.

به منظور بررسی اثر مقدار  $\text{SiC}_p$  بر استحکام پیوند بین ورقه‌های آلومینیومی، مقدار  $\text{SiC}_p$  ۰-۴ wt.% بین ورقه‌ها توزیع شد. به منظور انجام فرآیند نورد سرد پیوندی، پس از آماده‌سازی سطوح ورقه‌های آلومینیومی،  $\text{SiC}_p$  بر روی ورقه‌ها توزیع می‌شوند و سپس ورقه‌ها در جهتی که برسکاری شدند روی هم قرار داده می‌شوند و از چهار گوشه توسط سیم‌های فولادی به یکدیگر متصل شدند تا در طی فرآیند نورد سرد پیوندی هیچ گونه لغزشی بین آن‌ها اتفاق نیافتد.

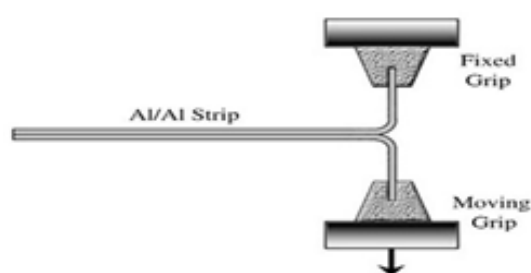
به منظور انجام پژوهش، همچنین پودر  $\alpha\text{-SiC}_p$  با خلوص ۹۹٪ با اندازه دانه حدود ۴۰ nm مورد استفاده قرار گرفت. این ذرات دارای خلوص بسیار بالایی بودند و عمده‌ترین ناخالصی موجود در آن‌ها ۰/۴ درصد کربن بود. سختی ذرات نیز در حدود ۲ GPa گزارش شده بود.

## ۲-۲- ارزیابی پارامترهای موثر بر استحکام پیوند

یکی از مهمترین پارامترها در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در روش نورد تجمعی پیوندی چسبندگی بین لایه‌های فلزی است، به گونه‌ای که تولید یک کامپوزیت بهینه در گروی چسبندگی مناسب بین لایه‌های مختلف است. بدین منظور، ابتدا ورقه‌هایی با ابعاد  $100 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$  در جهت نورد بریده شد. سپس ورقه‌ها به مدت ۲ ساعت در  $370^\circ\text{C}$  آنیل شدند و پس از آن بررسی پارامترهای موثر بر استحکام پیوند آغاز شد. سطوح فلزات معمولاً دارای آلودگی‌هایی از جمله لایه‌های اکسیدی، چربی، رطوبت، ذرات گرد و غبار و یون‌های سطحی می‌باشد. برای تولید یک پیوند متالورژیکی قوی و مناسب با فرآیند نورد، زدودن این آلودگی‌های سطحی از روی سطوح فلزات بسیار مهم است. بسیاری از محققان بر این عقیده‌اند که در فرآیند جوش خوردن سرد، بهترین روش آماده‌سازی سطحی، چربی‌زدایی اولیه و برسکاری بعدی ورق‌ها است [۲۵]. بنابراین، در این پژوهش ورق‌های آلومینیومی با چربی‌زدایی در حمام استون و سپس برسکاری با برس دایره‌ای که جنس آن از فولاد زنگ‌نزن با



شکل ۱: تصویر شماتیکی از فرآیند نورد سرد پیوندی در حضور ذرات  $\text{SiC}_p$ .



شکل ۲: تصویر شماتیکی از آزمون لایه کنی.

این گونه به نظر می‌رسد که در روش SD کاهش در قابلیت پیوندزنی تابعی از افزایش ضخامت لایه اکسیدی است. کاهش در قابلیت پیوندزنی در روش SD نسبت به روش پاششی می‌تواند به دو دلیل باشد: (۱) زمان تاخیری بین آماده‌سازی سطحی و نورد، (۲) خشک نمودن ورقه‌ها توسط خشک کن برقی برای ۳۰ دقیقه در  $50^\circ\text{C}$  که در فصل سوم بطور کامل به فرآیند آن اشاره شد. این دمای بالا و زمان تاخیر طولانی بین آماده‌سازی سطحی و نورد (برای تبخیر مایع موجود در محلول) شاید باعث افزایش ضخامت لایه اکسیدی شود [۲۸]. بنابراین، شکسته شدن لایه اکسیدی سخت تر خواهد شد و سطوح جدید فلزی نمی‌توانند به صورت موثر با یکدیگر پیوند برقرار نمایند. به دلیل تشکیل پیوند قوی‌تر در روش پاششی نسبت به روش SD، روش توزیع پاششی برای تحلیل و بررسی اثر مقدار  $\text{SiC}_p$  بر استحکام پیوند ورقه‌های آلومینیومی در ادامه پژوهش استفاده شد.

تصویر شماتیک این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. نورد سرد پیوندی در دستگاه نوردی به ظرفیت ۲۰ تن، قطر غلتک‌های نورد ۱۲۵ mm و سرعت غلتک  $2\text{ m/min}$  بدون افزودن هیچ گونه روان‌سازی انجام پذیرفت. افزایش دمای ناشی از کاهش ضخامت به همراه فشار بالا باعث ایجاد پیوند بین لایه‌های آلومینیوم می‌شود. برای بررسی استحکام مکانیکی پیوند بین نمونه‌ها از آزمون لایه کنی بر اساس استاندارد ASTM-D1876-01 استفاده شد.

طرح شماتیکی از این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است. این آزمون توسط دستگاه تست کشش و با سرعتی معادل  $20\text{ mm/min}$  انجام شد. نیروی لایه کنی اندازه‌گیری می‌شود و سپس متوسط استحکام چسبندگی توسط معادله زیر محاسبه می‌شود:

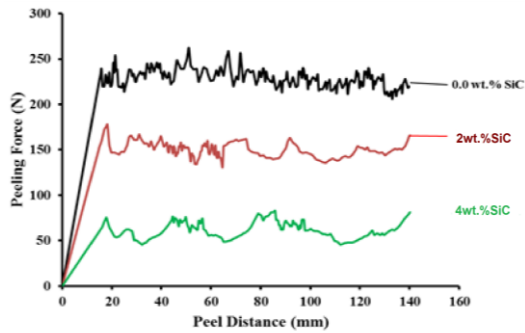
$$\text{استحکام چسبندگی میانگین} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}} \right) = \frac{\text{نیروی میانگین (N)}}{\text{پهنای پیوند (mm)}} \quad (1)$$

### ۳- نتایج و بحث

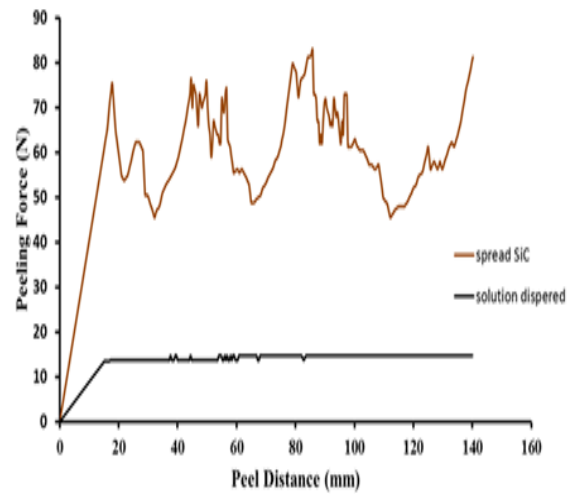
#### ۳-۱- اثر روش توزیع $\text{SiC}_p$ بر نیروی چسبندگی

برای به منظور بررسی اثر روش توزیع  $\text{SiC}_p$  بر نیروی چسبندگی، دو روش مورد بررسی قرار گرفت؛ روش توزیع محلولی (SD) و روش پاششی. شکل ۳ اثر روش توزیع بر نیروی چسبندگی ورقه‌های  $\text{Al-SiC}_p$  در کاهش ضخامت ۵۰٪ را نشان می‌دهد. مشخص است که با توزیع  $\text{SiC}_p$  به روش SD بین ورقه‌های آلومینیومی نیروی چسبندگی نسبت به روش اسپری کردن کاهش می‌یابد.

جماعتی و همکارانش [۲۷] نشان دادند که استحکام پیوند ورقه‌های Al-Al با افزایش زمان تاخیری بین آماده‌سازی سطحی و فرآیند نورد کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به دلیل تشکیل یک لایه نازک از اکسید، یون‌های جذب شده (سولفور، فسفر و اکسیژن)، آلودگی و ذرات گرد و غبار روی سطوح ورقه‌ها باشد.



شکل ۴: اثر مقدار ذرات تقویت کننده بر نیروی لایه کنی ورقه‌های آلومینیومی.

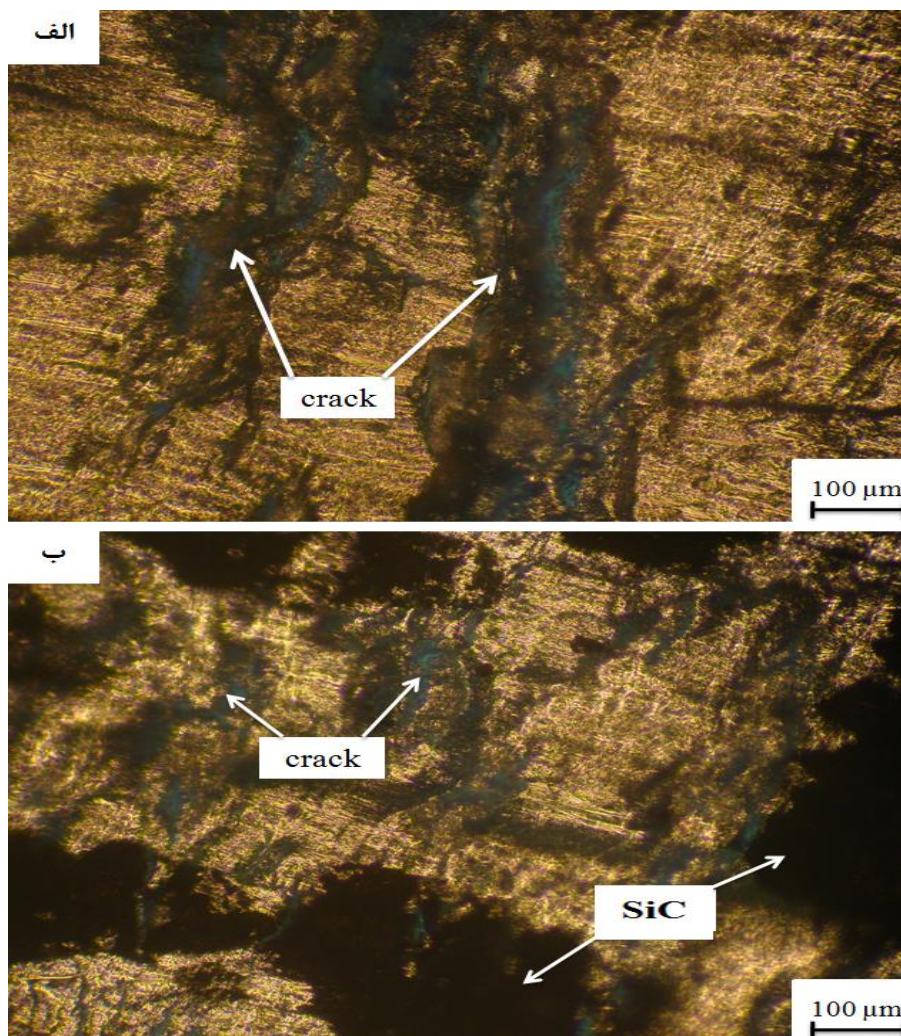


شکل ۳: اثر روش‌های مختلف توزیع SiCp بر نیروی لایه کنی ورقه‌های Al-2 wt.% SiCp در کاهش ضخامت ۵۰٪.

از شکل ۵ (الف) و (ب) می‌توان نتیجه گرفت که ترک‌های بیشتر باعث اکستروژن شدن مقدار بیشتری از فلز بکر زیرین می‌شود و بنابراین مساحت پیوندزنی شده‌ی بیشتری روی سطوح لایه کنی شده ورقه‌های Al-Al (شکل ۵ الف) در مقایسه با ورقه‌های Al-SiCp (شکل ۵ ب) شکل می‌گیرد. اینگونه به نظر می‌رسد که بررسی مکانیزم‌های درگیر در فرآیند خورد پیوندی در فهم اثر مقدار SiCp بر استحکام پیوند ورقه‌های کامپوزیتی بتواند کمک نماید. تاکنون چهار تئوری به منظور توضیح مکانیزم‌های درگیر در فرآیند خورد پیوندی پیشنهاد شده است. از جمله، تئوری فیلم [۲۹]، تئوری سد انرژی [۳۰، ۳۱]، تئوری پیوند زنی نفوذی [۳۲] و تئوری تبلور مجدد اتصالی [۳۳]. تئوری فیلم، تئوری حاکم بر فرآیند خورد پیوندی در دماهای محیط است. بر اساس تئوری فیلم، در طی خورد سرد پیوندی سطوح ترد دو لایه فلزی در برابر هم به صورت هم سیما شکسته می‌شود و ترک‌هایی عمود بر جهت خورد را بر سطح فلزات شکل می‌دهند. فلزات بکر زیرین در طی اعمال فشار عمودی خورد از طریق ترک‌های تعریض شده اکستروژن می‌یابند. مشخص شده است که پیوندزنی زمانی حاصل می‌شود که تغییر شکل باعث جریان یافتن فلزات بکر از بین این ترک‌ها شود. بنابراین، تغییر شکل باید به مقدار مشخص بزرگی برسد تا باعث برقراری پیوند بین این دو ورقه شود. مشخص شده است که تشکیل پیوند در حضور ذرات تقویت کننده شامل مراحل زیر می‌باشد [۳۴، ۳۵]:

### ۳-۲- اثر مقدار SiCp بر پیوند زنی

شکل ۴ اثر مقدار SiCp بر نیروی لایه کنی ورقه‌های آلومینیومی خورد سرد پیوندی شده را در یک کاهش ضخامت ثابت (۵۰٪) نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است، هنگامی که مقدار SiCp افزایش یافته است، نیروی لایه کنی کاهش یافته است. در مقادیر بالای SiCp (۴ wt.%)، پیوند ایجاد شده بین لایه‌ها تقریباً ۴ برابر کمتر از ورقه‌های Al-Al است. شکل ۵ سطح شکست ورقه‌های آلومینیومی بدون حضور ذرات تقویت کننده و ورقه‌های Al-SiCp در کاهش ضخامت برابر با یکدیگر (۵۰٪) را نشان می‌دهد. در این شکل، ترک‌ها بصورت آشکار نشان داده شده‌اند. فلز بکر سطوح زیرین در تماس بین این ترک‌ها اکستروژن می‌شوند و به یکدیگر می‌رسند. میانگین درصد ترک‌های موجود بر سطح لایه کنی شده نمونه‌ها از ۱۰ عکس از هر نمونه و توسط نرم‌افزار Image J محاسبه شد. طبق محاسبات انجام شده مشخص شد که میانگین درصد ترک‌های موجود بر سطح لایه کنی شده ورقه‌های Al-Al و Al-SiCp به ترتیب برابر با  $5 \pm 3\%$  و  $21 \pm 3\%$  است.



شکل ۵: سطح لایه کنی شده، الف) ورقه‌های آلومینیومی و ب) ورقه‌های  $\text{Al-4 wt.\% SiC}_p$  در کاهش ضخامت ۰.۵٪.

بر این اساس و بر پایه نتایج ذکر شده، تئوری فیلم می‌تواند به عنوان مکانیزم غالب در پیوند زنی بین لایه‌های آلومینیوم در نظر شود، همانگونه که سایر محققان نیز ذکر نموده اند [۳۶]. با استفاده از تئوری فیلم می‌توان پیشنهاد نمود که  $\text{SiC}_p$  مانع از اکستروژن شدن سطوح زیر از میان ترک‌های سطحی می‌شوند. بنابراین، در حضور  $\text{SiC}_p$  مساحت پیوندزنی و در نتیجه استحکام پیوند کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با پوشیده شدن سطح توسط  $\text{SiC}_p$ ، تعداد ترک‌ها نیز کاهش می‌یابد و فقط تعداد بسیار کمی از ترک‌ها در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند و بنابراین مقدار کمتری از فلز اکستروژن شده نیز به یکدیگر خواهد رسید [۳۳].

۱- شکست لایه سطحی به دلیل انبساط فصل مشترک در طی  
نورد  
۲- تشکیل ترک‌هایی عمود بر جهت نورد بر سطح فلز و جریان یافتن سطوح زیرین از میان این ترک‌های فصل مشترکی و ذرات تقویت کننده  
۳- پیوند فلزی بین سطوح فلزی تازه ساخته شده که دارای فاصله بین اتمی است.  
تصویر شماتیکی از تئوری فیلم در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۵ (الف) و (ب) تصاویر میکروسکوپ نوری از اکستروژن آلومینیوم از میان ترک‌های سطحی در حین نورد پیوندی ورقه‌ها نشان داده شده است.

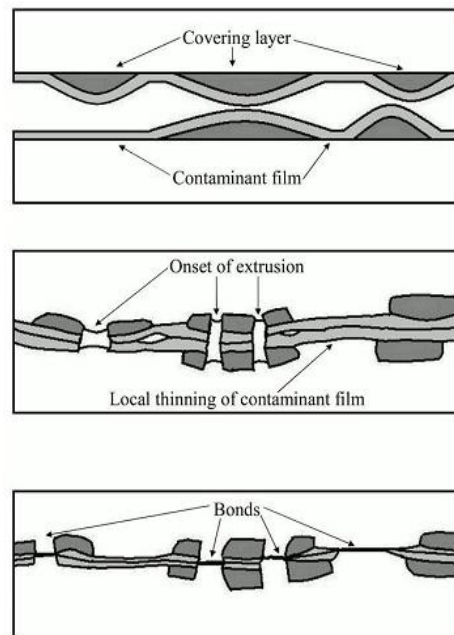
کاهش ضخامت (%)							مقدار SiC <sub>p</sub> (wt.%)
70	60	50	40	35	30	20	
میانگین نیروی چسبندگی (N)							
ش	391	223	158	104	80	8(±)	0
ش	246	149	92	46	17(±)	ن	2
ش	176	62	9(±)	ن	ن	ن	4

ن: نمونه‌هایی که هیچ گونه پیوندی ندارند، ش: نمونه‌هایی که سریعاً از سمت فلز پایه شکسته شدند، آ: تغییر شکل آستانه‌ای.

می‌شود که نمونه‌ها از سمت فلز پایه شکسته می‌شوند. این گونه به نظر می‌رسد که نوسانات نمودارها به نحوه توزیع ذرات SiC<sub>p</sub> در زمینه دلالت می‌نماید. همانگونه که به وضوح در شکل قابل مشاهده است، نوسانات نمودار در مقادیر بالای SiC<sub>p</sub> (۴ wt.% SiC<sub>p</sub>) در زمینه آلومینیومی بسیار زیاد است. این احتمالاً به دلیل تشکیل خوشه‌های SiC<sub>p</sub> مخصوصاً در غلظت‌های بالای SiC<sub>p</sub>، که در اکثر فرآیندهای ساخت اینگونه کامپوزیت‌ها گریزناپذیر است، می‌باشد. آگلومره‌های بسیار بزرگ SiC<sub>p</sub> برای خواص کامپوزیت بسیار مضر هستند، زیرا این آگلومره‌های بزرگ به عنوان ترک نقش ایفا می‌کنند و باعث تمرکز تنش در اطراف خود می‌شوند [۳۷].

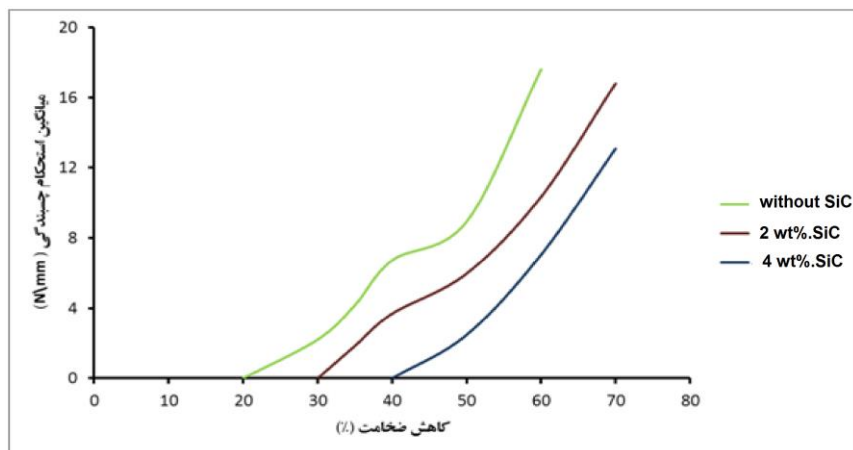
اثر کاهش ضخامت بر روی تغییر استحکام پیوند در حضور یا بدون حضور SiC<sub>p</sub> در شکل ۷ نشان داده شده است. می‌توان دید که تغییر فرم آستانه‌ای برای تشکیل پیوند با افزایش درصد نانو SiC<sub>p</sub> موجود در ساختار افزایش می‌یابد. در ابتدا لازم است تا به تعریف تغییر فرم آستانه‌ای بپردازیم، آنگونه که جماعتی و همکارانش [۲۳] ذکر کرده‌اند تغییر فرم آستانه‌ای به میزان حداقل کاهش سطح مقطعی اطلاق می‌گردد که کمتر از آن هیچگونه اتصالی بین فلزات در فرآیند نورد سرد پیوندی ملاحظه نمی‌گردد. علت این امر را با توجه به تئوری سد انرژی می‌توان توجیه نمود [۳۸].

بر اساس این تئوری، زمانی پیوند بین دو فلز بکر برقرار می‌گردد که بر سد انرژی بین این دو فلز غلبه نماید. در بالای این میزان تغییر فرم آستانه‌ای، با افزایش میزان کاهش در



شکل ۶: تصویر شماتیکی از تئوری فیلم [۲۸].

نتایج آزمون لایه کنی نمونه‌ها پس از انجام ۱ سیکل فرآیند نورد، برای مقادیر مختلف در کاهش ضخامت و مقدار SiC<sub>p</sub> در جدول ۲ به نمایش در آمده است. مشخص است که کاهش ضخامت آستانه‌ای در حضور ۲ و ۴ درصد وزنی کاربید سیلیکون به ترتیب در حدود ۳۰ و ۴۰٪ است. در واقع، کاهش ضخامت آستانه‌ای حداقل کاهش ضخامت مورد نیاز برای جلوگیری از جدا شدن ورقه‌ها پس از فرآیند نورد پیوندی در راستای فصل مشترک است. در بیشتر از این مقدار، استحکام پیوند سریعاً افزایش می‌یابد. در ادامه، برای کاهش ضخامت‌های زیاد، پیوند به قدری قوی



شکل ۱: تغییرات استحکام چسبندگی میانگین برای ورقه‌های آلومینیوم در برابر کاهش ضخامت.

۱- نیروی چسبندگی ورقه‌های Al-SiC<sub>p</sub> آماده شده به روش توزیع محلولی به دلیل دمای خشک نمودن بالا و زمان وقفه طولانی بین آماده‌سازی سطحی و فرآیند نورد، بسیار کم است.

۲- حضور SiC<sub>p</sub> و افزایش مقدار آن‌ها باعث کاهش نسبی نیروی چسبندگی بین ورقه‌های آلومینیومی آزمایش شده می‌شود. SiC<sub>p</sub> می‌تواند باعث کاهش در تعداد ترک‌های سطحی و ممانعت از اکستروژن فلز بکر زیرین شوند.

۳- تغییر فرم آستانه‌ای برای تشکیل پیوند با افزایش درصد نانو SiC<sub>p</sub> موجود در ساختار افزایش می‌یابد. این ذرات باعث کاهش استحکام پیوند می‌شوند. هنگامی که میزان کاهش ضخامت کمتر از میزان آستانه‌ای باشد ترک‌های سطحی‌ای که در فصل مشترک دو فلز چه با حضور یا بدون حضور ذرات نانو SiC<sub>p</sub> ایجاد می‌شود کمتر بوده که این نکته بازم بازم باعث کمتر اکستروژن شدن ماده بکر زیرلایه‌ای و تماس کمتر آن‌ها با یکدیگر و عدم برقراری پیوند بین این دو ماده می‌شود.

## مراجع

[1] K.M. Shu, G.C. Tu, *Materials and Manufacturing Processes*, **16**, 2001, 483.

ضخامت، استحکام پیوند بین دو فلز نیز بشدت افزایش می‌یابد.

تئوری فیلم نشان می‌دهد که ذرات نانو SiC<sub>p</sub> مانع خروج فلز بکر زیرین شده و در نتیجه نواحی پیوند خورده و در نتیجه استحکام پیوند بشدت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر هنگامی که میزان کاهش در ضخامت کمتر از میزان آستانه‌ای باشد ترک‌های سطحی‌ای که در فصل مشترک دو فلز چه با حضور یا بدون حضور ذرات نانو SiC<sub>p</sub> ایجاد می‌شود کمتر بوده که این نکته بازم بازم باعث کمتر اکستروژن شدن ماده بکر زیرلایه‌ای و تماس کمتر آن‌ها با یکدیگر و عدم برقراری پیوند بین این دو ماده می‌شود.

## ۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر میزان SiC<sub>p</sub> بر استحکام پیوند کامپوزیت نانو ساختار آلومینیوم/کاربید سیلیسیم توسط فرآیند نورد پیوندی تجمعی است.

در این پژوهش، تاثیر میزان SiC<sub>p</sub> بر استحکام پیوند کامپوزیت نانو ساختار آلومینیوم/کاربید سیلیسیم توسط فرآیند نورد پیوندی تجمعی مورد بررسی قرار گرفت.

مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:



- [19] K. Wu, H. Chang, E. Maawad, W.M. Gan, M.Y. Zheng, *Materials Science and Engineering A*, **527**, 2010, 3073.
- [20] A. Gajanan, M.R. Ramesha, H. Shivananda Nayakaa, S. Sahu, *Journal of Alloys and Compounds*, **724**, 2017, 146.
- [21] R. Jamaati, M.R. Toroghinejad, *Materials Science and Engineering A*, **527**, 2010, 4146.
- [22] H. Farajzadeh, M. Dehkordi, R. Toroghinejad, K. Raeissi, *Materials Science and Engineering: A*, **585**, 2013, 460.
- [23] R. Jamaati, M.R. Toroghinejad, *Materials Science and Engineering A*, **527**, 2010, 7430.
- [24] A. Fathy, D. Ibrahim, O. Elkady, M. Hassan, *Journal of Composite Materials*, DOI: 10.1177/0021998318781462, 2018.
- [25] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, *Materials science and technology*, **20**, 2004, 1064.
- [26] M.A. Soltani, R. Jamaati, M.R. Toroghinejad, *Materials Science and Engineering: A*, **550**, 2012, 367.
- [27] R. Jamaati, M. Toroghinejad, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **20**, 2011, 191.
- [28] L. Li, K. Nagai, F. Yin, *Science and Technology of Advanced Materials*, **9**, 2008, 023001.
- [29] L. Vaidyanath, M. Nicholas, D. Milner, *British Welding Journal*, **6**, 1959, 13.
- [30] H. Mohamed, J. Washburn, *Welding Journal*, **54**, 1975, 302.
- [31] J. Cave, *Journal of the Institute of Metals*, **101**, 1973, 203.
- [32] H. Granjon, *Fundamentals of Welding Metallurgy*, Woodhead Publishing, 1991.
- [33] M. Alizadeh, M. Paydar, *Materials & Design*, **30**, 2009, 82.
- [34] M. Rezayat, A. Akbarzadeh, *Materials & Design*, **36**, 2012, 874.
- [35] M. Eizadjou, H. Danesh Manesh, K. Janghorban, *Materials & Design*, **30**, 2009, 4156.
- [36] R. Jamaati, M.R. Toroghinejad, *Materials Science and Engineering: A*, **527**, 2010, 4858.
- [37] K. Deng, X. Wang, W. Gan, Y. Wu, K. Nie, K. Wu, M. Zheng, H. Brokmeier, *Materials Science and Engineering: A*, **528**, 2011, 1707.
- [38] D. Milner, L. Vaidyanath, *British Welding Journal*, **7**, 1960, 143.
- [2] A. Wagih, A. Fathy, *Advanced Powder Technology*, **27**, 2016, 403.
- [3] A. Wagih, A. Fathy, T.A. Sebaey, *International Journal of Materials and Product Technology*, **52**, 2016, 312.
- [4] M. El-Gallab, M. Sklad, *Journal of Materials Processing Technology*, **83**, 1998, 151.
- [5] B. Fan, T. Hou, R. Liu, L. Guan, H. Wang, R. Zhang, *Journal Wuhan University of Technology*, Materials Science Edition, **24**, 2009, 888.
- [6] S. Kumar, V. Balasubramanian, *Tribology International*, **43**, 2010, 414.
- [7] F. Kummel, B. Diepold, K. Florian, S. Christopher, S. Arun-Prakash, H. Werner, H. Mathias Goken, *Advanced Engineering Materials*, DOI:10.1002/adem.201800286, 2018.
- [8] J. Zhu, L. Liu, H. Zhao, B. Shen, W. Hu, *Materials and Design*, **28**, 2007, 1958.
- [9] K.E. Pappacena, M.T. Johnson, H. Wang, W.D. Porter, K.T. Faber, *Composites Science and Technology*, **70**, 2010, 478.
- [10] K.M. Shu, G.C. Tu, *Materials Science and Engineering A*, **349**, 2003, 236.
- [11] M. Rosso, *Journal of Materials Processing Technology*, **175**, 2006, 364.
- [12] H. Yu, K. Tieu, C. Lu, *Procedia Engineering*, **81**, 2014, 96.
- [13] A. Azushima, R. Kopp, Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **57**, 2008, 716.
- [14] A. Wagih, A. Fathy, D. Ibrahim, *Journal of Alloys and Compounds*, **752**, 2018, 137.
- [15] G. Krallics, J.G. Lenard, *Journal of Materials Processing Technology*, **152**, 2004, 154.
- [16] M. Eizadjou, A. Kazemi Talachi, H. Danesh Manesh, H. Shakur Shahabi, K. Janghorban, *Composites Science and Technology*, **68**, 2008, 2003.
- [17] D. Yang, P. Cizek, P. Hodgson, C. Wen, *Scripta Materialia*, **62**, 2010, 321.
- [18] G. Min, J.M. Lee, S.B. Kang, H.W. Kim, *Materials Letters*, **60**, 2006, 3255.