

## تأثیر حضور کربن بلک بر استحکام اتصال آلومینیوم/پلی اتیلن

### در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

تکتم کیان‌افشار<sup>۱</sup>، مهدی هامون‌پیما<sup>۲</sup>، سمانه صاحبیان سقی<sup>۳</sup>، محسن حداد سبزواری<sup>۴</sup>.

t.kianafshar@gmail.com

#### چکیده

از ابتدای تاریخ بشر اتصالات قطعات مختلف به یکدیگر یک موضوع مهم بوده که از طریق آن صنایع قابلیت اتصال بخش‌های مختلف یک قطعه را به یکدیگر داشته باشند و قطعه‌ای یکپارچه تهیه کنند. به دلیل پیچیدگی روش‌های اتصال متداول، تمایل زیادی به پژوهش و توسعه‌ی روش‌های اتصال جدید برای این دسته از ساختارها در سال‌های اخیر وجود دارد. هدف اصلی این مقاله بررسی استحکام اتصال آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ به کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ذرات کربن بلک می‌باشد. اتصال به وسیله‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد و استحکام نقطه‌ی جوش با انجام تست کششی برشی بر روی نمونه‌ها به دست آمد. در این تحقیق درصد کربن بلک افزوده شده به پلی‌اتیلن و مدت زمان ماندگاری بین دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، بر استحکام کششی ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده با افزایش زمان ماندگاری برای پلی‌اتیلن خالص و کامپوزیت‌های آن تا زمان ۱۰ ثانیه سطح ترشوندگی آلومینیوم توسط مذاب پلی‌اتیلن تقویت شده با ذرات کربن بلک، بیشتر شده و در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کربن بلک، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، کششی برشی، مدت زمان ماندگاری بین، پلی‌اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا، سطح ترشوندگی.

<sup>۱</sup>دانشجو، کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup>دانشجو، دکتری مهندسی متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup>استادیار، دکتری مهندسی متالورژی، تخصص در پلیمرها، نانو کامپوزیت‌ها و خواص حرارتی و مغناطیسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۴</sup>استاد، دکتری مهندسی متالورژی، تخصص در انجماد سریع، ریخته‌گری و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف از جمله صنعت اتومبیل، نیاز به مواد مقرون به صرفه با استحکام بالا و وزن پایین برای ساخت بدنه به صورت روزافزونی احساس می‌شود. پلیمرها در رده پرمصرفترین مواد در جهان قرار گرفته‌اند، در حقیقت سهولت فرایندپذیری پلیمرها و پلاستیک‌ها موجب شده‌است که آن‌ها تبدیل به پرکاربردترین مواد عصر حاضر شوند. به دلیل چگالی کم و توانایی آن‌ها برای شکل‌گیری و قالب‌گیری در دماهای نسبتاً کم، از پلیمرها به جای مواد سنتی مانند فلزات در ساخت قطعات ترکیبی طی فرایند مونتاژ قطعات استفاده می‌شود. همین امر سبب شده‌است که توجه بسیاری از محققان به اتصال مواد پلیمری و یا مواد پلیمری با سایر مواد از جمله فلزات جلب شود. به دلیل تفاوت زیاد خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی پلیمرها و فلزات، اعمال روش‌های مرسوم جوشکاری برای اتصال این مواد غیرممکن است. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی پربازده تر در مقایسه با اتصال دهی شیمیایی چسبی یا مکانیکی با پیچ و پرچ مطرح شده است. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرایندی مناسب به منظور اتصال دهی حالت جامد فلز به پلیمر است. در گذشته این روش برای اتصال دهی آلیاژهای آلومینیوم به کار می‌رفت اما به علت مزایای ثابت شده‌ی آن این روش برای جوشکاری مواد فلزی دیگر، پلیمرها و حتی اتصال دهی مواد غیرمشابه نیز به کار می‌رود. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای روی استحکام جوش ترموپلاستیک‌ها از جمله ورق‌های پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا بسیار تأثیرگذار است. این متغیرها شامل سرعت چرخش ابزار، نرخ فروری و عمق فروروی ابزار، زاویه‌ی شیب ابزار و شکل هندسی آن می‌باشند.

در سال ۲۰۱۱ م. کمال بلقی<sup>۵</sup> و ا. ایرفان یوکلر<sup>۶</sup> جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای جهت اتصال ورقه‌های پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا و ضخامت ۴ میلی‌متر را بررسی نمودند. طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش زمان ماندگاری و سرعت چرخش ابزار بر استحکام اتصال تأثیرگذارند. با افزایش زمان ماندگاری دما در منطقه‌ی جوش افزایش یافته و در نتیجه استحکام اتصال نیز افزایش می‌یابد، همچنین اغتشاش پین با سرعت چرخشی ابزار افزایش یافته و در نتیجه استحکام اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیز روند صعودی دارد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت چرخش ابزار، عمق فروروی ابزار، زمان ماندگاری تعیین شده و هندسه‌ی ابزار در شکل‌گیری اتصال و استحکام آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۱]. ملندر<sup>۷</sup> و همکارانش قابلیت اتصال آلیاژ آلومینیوم به پلی‌فنیلن سولفید را توسط

<sup>۵</sup> Mustafa Kemal Bilici

<sup>۶</sup> Ahmet Irfan Yukler

<sup>۷</sup> Melander

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی نموده و تأثیر پارامترهای اتصال را بر روی استحکام اتصال و حالت‌های شکست مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق منطقه‌ی جوش شامل مخلوطی از تکه‌های آلومینیوم بوده که توسط زمینه‌ی پلی‌فنیلن سولفید احاطه شده‌اند. آن‌ها نشان دادند که اندازه‌ی تکه‌های فلزی با افزایش سرعت چرخش ابزار درشت‌تر می‌شوند [۲]. شاهمیری<sup>۸</sup> و همکارانش امکان اتصال آلیاژ آلومینیوم را به ورقه‌های پلی‌پروپیلن<sup>۹</sup> با اتصال لبه‌ای اغتشاشی اصطکاکی بررسی نموده و تأثیر گرمای ورودی بر روی ریزساختار و رفتار مکانیکی اتصال مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده یک لایه‌ی متوسط در فصل مشترک آلومینیوم/پلی‌اتیلن تشکیل شده که شامل عناصر اکسیژن، آلومینیوم و کربن می‌باشد. اما به دلیل چسبندگی نسبتاً ضعیف این لایه به زمینه، شکافی بین آلومینیوم و زمینه‌ی پلیمری تشکیل و باعث کاهش استحکام برشی با افزایش گرمای ورودی می‌شود [۳]. باله و همکاران از جوشکاری فراصوت برای اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ به صفحات پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استحکام برشی اتصال به ۳۲ MPa رسیده است [۴]. یوکی اوگاوا<sup>۱۰</sup> و همکارانش امکان اتصال آلیاژ آلومینیوم به پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن را با به کار بردن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی نموده و تأثیر عملیات سطحی آلیاژ آلومینیوم روی خواص خستگی و مکانیزم شکست اتصال مواد غیرمشابه را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق میانگین مقاومت کششی برای سری بدون عملیات، سری پوشش آلی و سری لایه متخلخل به ترتیب ۵/۷، ۷/۴ و ۶۶ کیلونیوتن تخمین زده شد، بنابراین با عملیات سطحی، استحکام اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای افزایش می‌یابد [۵].

حامد آقاجانی<sup>۱۱</sup> و همکارانش در پژوهشی که بر روی آلیاژ آلومینیوم-منیزیم AA۵۰۵۸ و ورقه‌های پلیمر پلی‌متیل متاکریلات<sup>۱۲</sup> (PMMA) انجام دادند، تأثیر زاویه‌ی شیب ابزار را بر روی کیفیت سطح جوش بررسی نمودند. آن‌ها دریافته‌اند که در زوایای پایین‌تر، شکل جوش غیرمشابه ناپیوسته به نظر می‌رسد به دلیل اینکه جریان مواد از لبه‌ی جلویی به پشتی متوقف می‌شود، در حالی که با افزایش زاویه‌ی شیب ابزار، ظاهر سطح جوش‌های غیرمشابه همگن‌تر شده و همچنین ابعاد بالاتری از تکه‌های آلومینیوم از آلیاژ پایه آلومینیوم جدا شده و به منطقه‌ی جوش افزوده می‌شود [۶]. در پژوهشی دیگر نیز که توسط حامد آقاجانی و عبدالرضا سیمچی بر روی اتصال T شکل پلی‌متیل متاکریلات و آلیاژ آلومینیوم AA۵۷۵۴ با استفاده از جوشکاری FSW انجام گرفته‌است و مجدداً پارامترهای جوشکاری مورد بررسی

<sup>۸</sup> Shahmiri

<sup>۹</sup> polypropylene

<sup>۱۰</sup> Yuki Ogawaa

<sup>۱۱</sup> Hamed Aghajani

<sup>۱۲</sup> Polymethyl methacrylate

قرار گرفته‌است، مشخص شد که با افزایش زاویه‌ی شیب، دمای پیک نیز افزایش می‌یابد اما ناحیه‌ی SZ کاهش پیدا می‌کند و HAZ بزرگ‌تری تشکیل می‌شود. همچنین در سرعت‌های چرخش پایین و سرعت حرکت ابزار بالا به دلیل گرمای ورودی پایین‌تر ایجاد شده ناحیه‌ی SZ کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که عمق فروروی ابزار نیز بر روی نواحی SZ و HAZ تأثیرگذار است به گونه‌ای که با افزایش عمق فروروی منطقه‌ی SZ کاهش یافته و منطقه‌ی HAZ افزایش می‌یابد [۷].

آمانسیو-فیلو<sup>۱۳</sup> و همکارانش قابلیت اتصال آلیاژ منیزیم AZ31 به پلیمر تقویت‌شده با الیاف را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که اتصالات اصطکاکی نقطه‌ای<sup>۱۴</sup> (FSPJ) دارای استحکام برشی بالاتری از اتصالات پایه چسب می‌باشند، در حالی که FSPJ تنها محدود به طراحی جوشکاری نقطه‌ای است [۸]. لیو<sup>۱۵</sup> و همکارانش از جوشکاری اصطکاکی لبه‌ای<sup>۱۶</sup> (FLW) برای اتصال MC NYLON6 به صفحات AA6۰۶۱ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای جوشکاری تأثیر بسیار زیادی بر استحکام برشی اتصال (۵-۸MPa) دارد [۹].

در این تحقیق تلاش شده‌است که مشکلات اتصال دهی نامتجانس<sup>۱۷</sup> قطعاتی که دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به یکدیگر می‌باشند، برطرف گردد. همچنین با هدف بهبود استحکام اتصال بین دو ماده‌ی نامتجانس آلومینیوم و یک کامپوزیت زمینه پلیمری، به زمینه‌ی پلیمری کامپوزیت ذرات رسانای کربن بلک افزوده گردید و سپس میزان تأثیر زنجیره‌های ذرات هدایت‌کننده‌ی کربن بلک در هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها و تأثیر افزایش رسانایی حرارتی فاز زمینه بر روی استحکام اتصال کامپوزیت به آلومینیوم مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق ورقه‌های آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ به ضخامت ۲ میلی‌متر و ورقه‌های پلی اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا و کامپوزیت‌های زمینه پلی اتیلن که با دوده (پودر کربن سیاه) N-220 تقویت شده‌اند و دارای ابعاد ۵cm × ۱۰cm و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد، به کار برده شد. تعدادی نمونه شامل پلی اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا و تعدادی نمونه‌ی کامپوزیتی که با ۵٪ و ۱۰٪ پودر کربن بلک تقویت شده‌اند با انجام مراحل زیر تهیه گردید. در ابتدا مقداری پودر پلی اتیلن سنگین و کربن بلک برای تهیه نمونه‌هایی با ۵ و ۱۰ درصد وزنی کربن بلک با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای با سرعت ۳۰۰rpm به مدت ۱۵ دقیقه با یکدیگر

<sup>۱۳</sup> Amancio-Filho

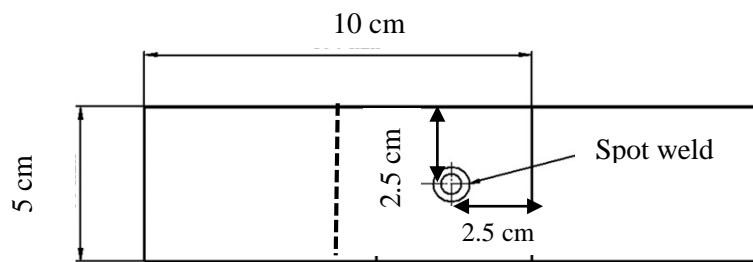
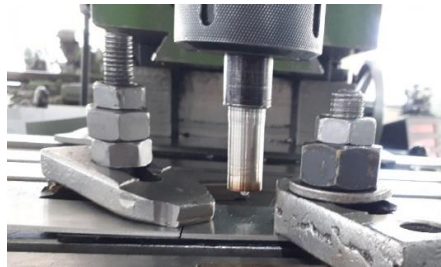
<sup>۱۴</sup> Friction spot joining

<sup>۱۵</sup> Liu

<sup>۱۶</sup> Friction lap joining

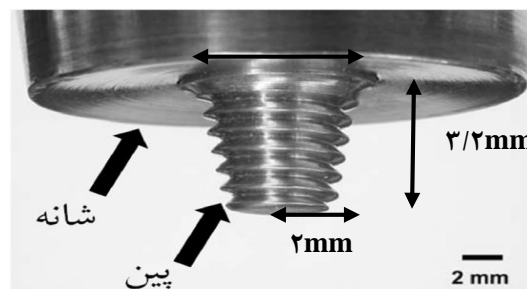
<sup>۱۷</sup> Heterogeneous

مخلوط شدند. پس از آن توسط دستگاه پرس گرم ۵۰ تن هیدرولیک مدل sph 500 ، تحت فشار ۴۵ تن و دمای ۱۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قطعات کامپوزیتی تهیه گردید. بعد از تهیه شدن نمونه‌ها یک قطعه کامپوزیت و یک قطعه آلومینیوم با ابعاد ۱۰cm × ۵cm روی یکدیگر قرار گرفته به گونه‌ای که فلز آلومینیوم در قسمت فوقانی و کامپوزیت زمینه پلیمری در قسمت تحتانی باشد و با استفاده از دستگاه فرز با سرعت ۲۵۰۰rpm ، عمق فروروی ۳/۲ میلی‌متر و نرخ فروروی ۴۰ mm/min به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که از این پس به جهت رعایت اختصار FSSW نامیده می‌شود؛ به یکدیگر متصل شدند. شکل ۱ نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شکل اتصال لبه روی هم قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی در دستگاه جوش FSSW.

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل ابزاری است که می‌تواند حرکات چرخشی و محوری (بالا و پایین) داشته‌باشد. ابزار مورد استفاده در این پژوهش شامل یک پین با قطرهای ۲ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر و ارتفاع ۳/۲ میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۲ نیز نمایش داده شده است.



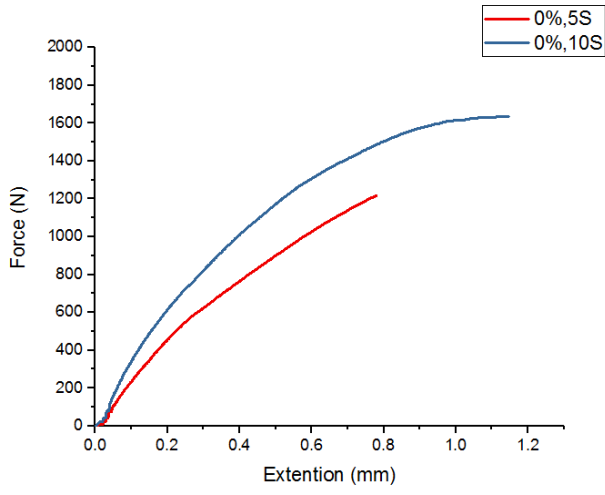
## شکل ۲- ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به همراه معرفی اجزا.

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل سه مرحله می‌باشد: فروروی، اغتشاش و خروج ابزار. این فرایند با چرخش ابزار در سرعت چرخشی بالا آغاز می‌شود. سپس ابزار به نقطه‌ی جوش وارد شده تا شانه‌ی ابزار در تماس با بالای سطح قطعه کار بالایی قرار بگیرد. حرکت فرورونده‌ی ابزار باعث می‌شود که مقداری از ماده خارج شود وقتی ابزار به عمق از پیش تعیین شده می‌رسد، حرکت فروروی پایان می‌یابد و مرحله‌ی اغتشاشی شروع می‌شود. در این مرحله پین در قطعه کار بدون فروروی می‌چرخد. گرمای اصطکاکی در مرحله‌ی فروروی و اغتشاشی ایجاد می‌گردد، بنابراین ماده‌ی نزدیک به ابزار گرم و نرم می‌شود. مواد قطعه کار بالایی و پایینی نرم شده و در مرحله‌ی اغتشاش با یکدیگر مخلوط می‌گردد. شانه‌ی ابزار تنش‌ی فشاری را روی ماده‌ی نرم شده ایجاد می‌کند و در نتیجه یک اتصال جامد در مرحله‌ی اغتشاش شکل می‌گیرد. زمانی که اتصال مورد نظر به دست آمد، فرایند پایان می‌یابد و ابزار از قطعه کار خارج می‌شود. در اثر خارج شدن ابزار از قطعه کار سوراخی در وسط اتصال ایجاد می‌گردد. آزمایش کشش بر روی نمونه‌ها برای به دست آوردن میزان استحکام کششی برشی آن‌ها نیز در دمای اتاق و با سرعت  $2 \text{ mm/min}$  با استفاده از دستگاه یونیورسال<sup>۱۸</sup> ساخت شرکت سنتام طبق استاندارد DIN EN ISO 14273 انجام شد.

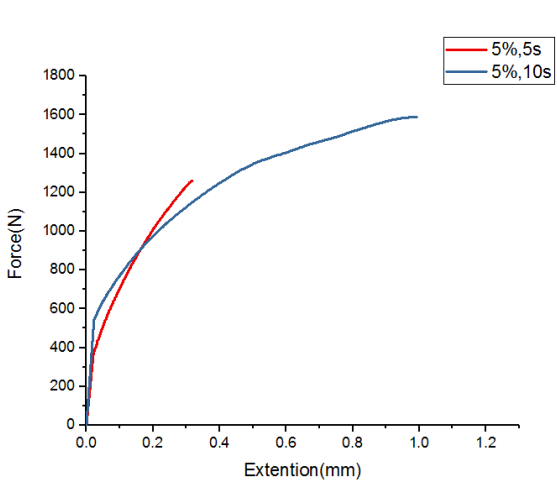
## ۳- نتایج و بحث

نتایج استحکام برشی اتصال دو فاز برای نمونه‌های ۰٪، ۲/۵٪ و ۵٪ در مدت زمان‌های ماندگاری ۵S و ۱۰S به صورت منحنی‌های نیرو-تغییر طول به ترتیب در شکل ۳ آمده است.

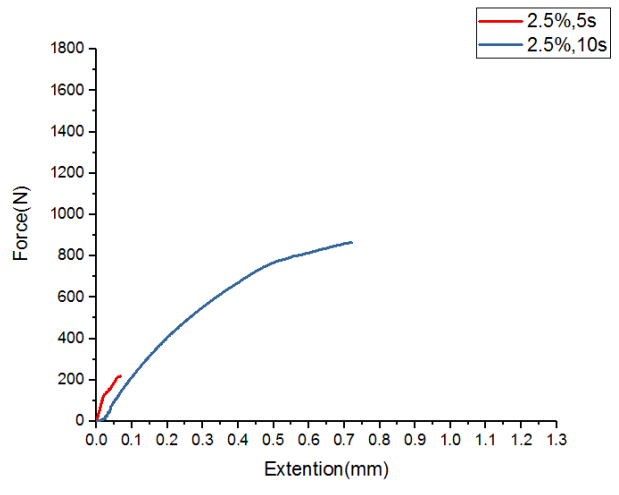
<sup>۱۸</sup> Universal



(الف)



(ج)

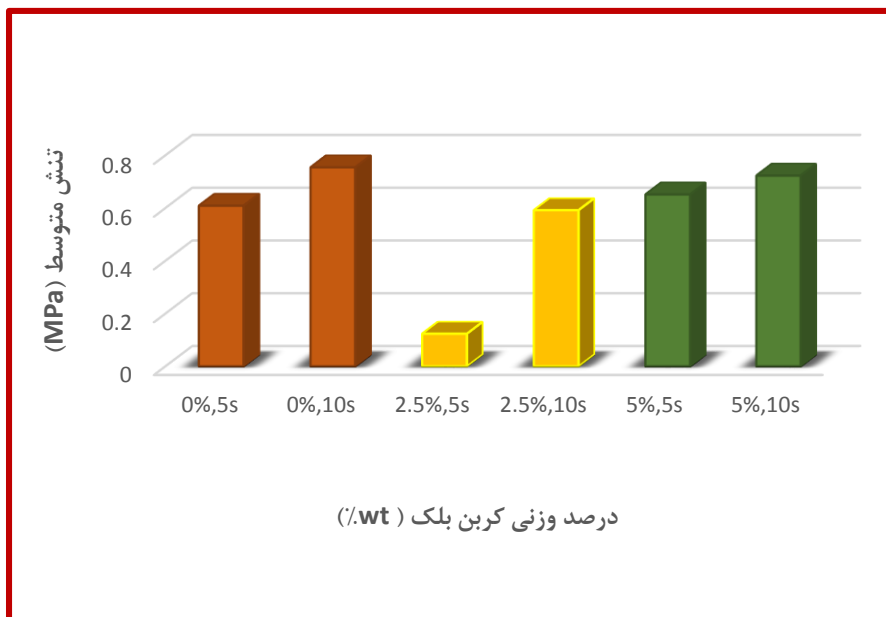


(ب)

شکل ۳- رسم منحنی‌های نیرو-ازدیاد طول برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با (الف) ۰ درصد، (ب) ۲/۵ درصد و (ج) ۵ درصد وزنی کربن بلک در زمان‌های ماندگاری ۵S و ۱۰S.

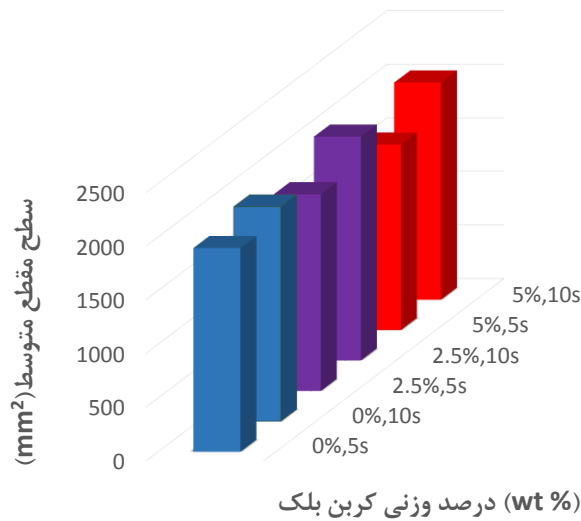
با توجه به نمودار نیرو جابجایی در بازه زمانی ۵ ثانیه برای نمونه‌ها با درصدهای وزنی ۰، ۲/۵٪ و ۵٪ زمان کافی جهت ایجاد اتصال مطلوب فراهم نشده است. در نتیجه نیروی لازم جهت شکست اتصال مقدار کمی است. اما با افزایش زمان تا ۱۰ ثانیه افزایش سطح در تماس در ناحیه اتصال مشاهده شده و در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی عامل رسانایی حرارتی بر ویسکوزیته می‌باشد.

منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی نمونه کامپوزیتی پلی اتیلن تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک که در شکل ۳(ج) مشاهده می‌شود. روند افزایشی ویسکوزیته به سبب حضور بیشتر کربن بلک به عنوان اثر منفی در ایجاد اتصالی با خواص مکانیکی مطلوب و از طرفی هدایت حرارتی بالاتر به واسطه‌ی افزایش کربن بلک که سبب حس دمایی بالاتر در زمان‌های ماندگاری ثابت نسبت به پلی اتیلن خالص و کامپوزیت تقویت شده با درصد کمتر کربن بلک می‌گردد، به عنوان پارامتر مثبت در ایجاد اتصال مطلوب نقش دارند. به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج به دست آمده، نمودارهای میله‌ای تنش متوسط - درصد وزنی کربن بلک و سطح مقطع متوسط چسبندگی - درصد وزنی کربن بلک برای تمام حالت‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۴- نمودار میله‌ای نتایج حاصل از آزمون کشش برای پلی اتیلن خالص و کامپوزیت‌های آن در زمان‌های ماندگاری ۵ و ۱۰ ثانیه.



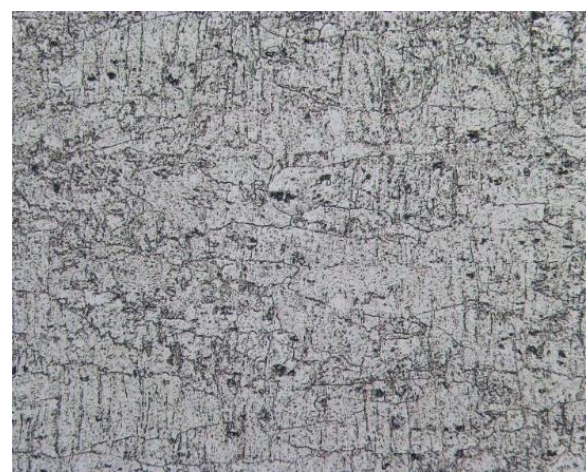


شکل ۵- نمودار میله‌ای نتایج حاصل متوسط سطح مقطع در درصد‌های وزنی ۰، ۲/۵ و ۵ درصد کربن بلک.

با توجه به شکل ۵ سطح مقطع اتصال در نمونه کامپوزیتی با افزایش درصد کربن روند نزولی داشته و این بدان معنی است که ویسکوزیته نمونه تاثیر بیشتری نسبت به رسانش حرارتی ساختار کامپوزیتی دارد. در نتیجه استحکام اتصال در همه‌ی زمان‌های ماندگاری فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش درصد کربن بلک به سبب سطح مقطع کمتر افزایش یافته است. علاوه بر این در بازه‌ی زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه روند افزایشی استحکام اتصال مشاهده می‌شود، علت افزایش استحکام اتصال در بازه‌ی زمانی بیشتر، دمای بالاتری است که ساختار کامپوزیتی در زمان‌های ماندگاری بالا داشته که سبب غلبه‌ی رسانایی حرارتی کامپوزیت بر ویسکوزیته‌ی آن شده و همین امر سبب افزایش سطح ترشده‌ی آلومینیوم توسط کامپوزیت و ذوب شدگی و تغییر شکل شدید کامپوزیت در حین جوشکاری می‌گردد. شکل ۶ تصاویر ریزساختاری آلومینیوم ۵۰۸۳ را قبل از انجام جوشکاری و شکل ۷ تصاویر ریزساختاری آلومینیوم را بعد از انجام فرایند جوشکاری در بزرگنمایی‌های ۲۰۰X و ۵۰۰X نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی این تصاویر می‌توان به ریزدانه شدن آلومینیوم بعد از انجام فرایند جوشکاری به دلیل ایجاد تبلور مجدد در ریز ساختار آلومینیوم بعد از انجام جوشکاری پی برد.



(ب)

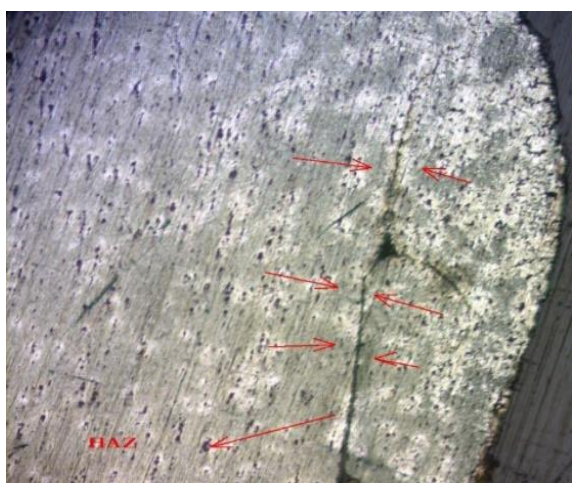


(الف)

شکل ۶- ریزساختار ناحیه‌ی جوش در بزرگنمایی‌های (الف)  $200\times$  و (ب)  $500\times$ .



(ب)



(الف)

شکل ۷- ریزساختار منطقه‌ی HAZ در بزرگنمایی‌های (الف)  $100\times$  و (ب)  $200\times$ .

#### ۴- نتیجه گیری:

۱) افزایش زمان ماندگاری ابزار سبب افزایش دما و در نتیجه در نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات کربن بلک که رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به پلی اتیلن خالص دارند در بازه ی زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه روند افزایشی استحکام اتصال مشاهده می شود.

۲) تصاویر ریزساختاری نشان می دهند که در ناحیه ی جوش تاثیر هم زمان تغییر شکل پلاستیک شدید و گرمای اصطکاکی در طول فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای باعث به وجود آمدن یک ریزساختار تبلور مجدد یافته ی ریزدانه درون این ناحیه می شود.

#### ۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از ریاست محترم دانشکده ی فنی شهید منتظری مشهد که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر نموده و از تلاش های ارزشمند جناب آقای مهندس امیرحسین رفیعی و جناب آقای مهندس سجاد فلاح کمال تشکر و قدردانی را داریم.

#### ۶- مراجع:

[۱] M. Kemal Bilici and A. Irfan Yukler, "Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets", journal of *Materials & Design*, 33, 545-550.

[۲] W. Ratanathavorn and A. Melander, "Dissimilar joining between aluminium alloy (AA 6111) and thermoplastics using friction stir welding", journal of *Science and Technology of Welding and Joining*, 20, 222-228.

[۳] H. Shahmiri, M. Movahedi and AM. Kokabi, "Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets", journal of *Science and Technology of Welding and Joining*, 22, 20-126.

[۴] F. Balle et al, "Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites", journal of *Materials Processing Technology*, 247, 289-295.

[۵] Y. Ogawaa et al, "Fatigue properties of friction stir welds of treated Al to carbon fibre- reinforced Plastic", journal of *Science and Technology of Welding and Joining*, 23, 79-86.

[۶] H. Aghajani Derazkola, R. Kashiry Fard and F. Khodabakhshi, "Effects of processing parameters on the characteristics of dissimilar friction-stir-welded joints between AA5058 aluminum alloy and PMMA polymer", journal of *welding in world*, 62, 117-130.



[v] H. Aghajani Derazkola and AR. Simchi, “An investigation on the dissimilar friction stir welding of T-joints between AA5754 aluminum alloy and poly(methyl methacrylate)”, *Journal of Thin-Walled structures*, 135, 376-384.

[ا] ST. Amancio-Filho et al, “On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures”, *journal of Materials Science and Engineering*, 528, 3841-3848.

[ا] Liu FC, Liao J, Nakata K. “Joining of metal to plastic using friction lap welding”, *journal of Materials & Design*, 54, 236-244.