

بررسی اثر پارامترهای سرعت چرخش، پیشروی و عمق نفوذ ابزار در اتصال فلز به کامپوزیت توسط فرایند جوش اصطکاکی

در تحقیق پیشرو که به بررسی تجربی اتصال فلز و کامپوزیت به روش اتصال اصطکاکی (FLJ) می‌پردازد، کامپوزیت الیاف شیشه با ماتریس ترموپلاست پلیمری PA6 با ۲۰٪ وزنی الیاف چاپد شیشه و آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ مورد استفاده قرار گرفته‌اند و هدف بررسی استحکام نمونه‌های متصل شده به روش اتصال اصطکاکی روی هم در دو حالت استاتیکی و خستگی و تحقیق در مورد اثر پارامترهای نرخ پیشروی، سرعت دورانی و عمق نفوذ مختلف برای هر نمونه بر خواص مکانیکی می‌باشد. پس از اتصال نمونه‌ها و انجام تست‌های مربوط مشخص شد که اتصال تحت تأثیر هر سه پارامتر قرار می‌گیرد، به طوریکه در عمق نفوذ کمتر و نرخ پیشروی بیشتر و سرعت دورانی متوسط بالاترین استحکام کششی حاصل شد. به نحوی که هر چه فشار و حرارت در ناحیه اتصال بیشتر می‌شد، ضخامت کامپوزیت موردنظر در ناحیه سطح مشترک نازک‌تر شده و باعث کاهش مقاومت اتصال می‌گردد. شکست اتصالات به دلیل وجود تخلخل و حباب‌های به وجود آمده در سطح مشترک اتصال بود. اتصالات در تست خستگی استحکام خوبی داشتند، به طوری که شکست ۷۲٪ آن‌ها به صورت شکست چقرمه در سازه کامپوزیت بود و نه در محل اتصال بین کامپوزیت و فلز.

محمدهادی عابدی خلوت^۱

کارشناسی ارشد

روح‌اله حسینی^۲

استادیار

علیرضا نداف اسکوئی^۳

دانشیار

واژه‌های راهنما: پلی‌آمید PA6، ترموپلاستیک، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲، اتصال اصطکاکی، تست خستگی، تست استاتیکی

۱- مقدمه

در ساخت بسیاری از سازه‌ها و تجهیزات از ترکیب فلز و کامپوزیت استفاده می‌گردد و لازم است این دو در قسمت‌هایی به یکدیگر متصل شوند. روش‌های مختلفی در اتصال ورق‌های فلزی به کامپوزیت وجود دارد. روش عمده و رایج اتصال استفاده از اتصالات پیچی و پرچی و یا حتی چسبی می‌باشد که موجب صدمه دیدن به کامپوزیت شده و یا استحکام قابل قبولی ندارند [۱]. یکی از روش‌هایی که در تحقیقات اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، استفاده از روش اصطکاکی می‌باشد [۲]. بدین ترتیب که در محل اتصال فلز به کامپوزیت دمای بخشی از فلز را با استفاده از ابزار دوار در آن منطقه بالا برده و همین امر موجب ذوب شدن

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد تهران شمال mohammadhadi.a.1371@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران R.Hosseini.mech@gmail.com

^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران anadaf@eyc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

ماتریس ترموپلاست کامپوزیت شده و این ذوب‌شدگی باعث اتصال سطح مشترک فلز و کامپوزیت می‌گردد و استحکام قابل‌قبولی را در این منطقه فراهم می‌آورد [۳]. در اغلب سازه‌های ترکیبی فلز و کامپوزیت، مقاومت ضعیف در راستای ضخامت و مقاومت پایین حرارتی رزین زمینه باعث می‌شوند که هنوز سهم قابل توجهی از سازه‌ها فلزی باشد. لذا افزایش استحکام اتصال توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. در اکثر کاربردهای واقعی، کامپوزیت باید به چارچوب‌های فلزی متصل شود تا یک سازه‌ی کامل را تشکیل دهند [۴]. طراحی ترکیبی یک زمینه جذاب و کاربردی می‌باشد که به تازگی توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف نموده است. تحقیقات وسیع و گسترده‌ای در مورد انواع روش‌های مختلف اتصال فلز و کامپوزیت انجام شده است. اتصال چسبی فرآیند متصل کردن دو جزء با استفاده از یک متصل‌کننده مناسب (به عنوان مثال چسب) است. کاربردهای چسب برای اتصال اجزای ساخته شده از مواد غیرمشابه به صورت مشترک در صنایع هواپیمایی و اتومبیل و ساختمان بکارگرفته می‌شوند. از آنجا که اتصال چسبی یک فرایند برگشت‌ناپذیر است، تلاش برای جدایش اتصال‌ها هزینه‌بر خواهد بود که باعث آسیب کامل مواد درگیر در اتصال می‌شود. اتصال چسبی نه تنها اتصال را آب‌بندی می‌کند، بلکه از شکاف و خوردگی گالوانیک بین دو ماده غیرمشابه نیز جلوگیری می‌کند. تقریباً هر جفت از مواد غیرمشابه مانند فلزات، پلیمرها یا سرامیک‌ها می‌توانند با این روش متصل شوند. اتصال چسبی تنها روش قابل دوام برای بدست آوردن سازه‌هایی است که شامل اتصال اجزای جدارنازک می‌شوند [۱]. برای عمل‌آوری سطح و اتصال بهتر چسب راهکارهایی توسط ری^۱ و همکاران [۳] بیان شد. دیفیوژن فرایندی است که در آن مهاجرت مولکول‌ها و اتم‌های جزء تشکیل‌دهنده اصلی با توجه به گرادیان تجمع و معمولاً از محل کم تجمع به انتهای زیاد اتفاق می‌افتد. همان‌طور که به عنوان جوش دیفیوژن یا اتصال حالت صلب شناخته می‌شود؛ اتصال دیفیوژن فرایندی است که دو ماده متشابه یا غیرمتشابه را براساس پخش اتمی اجزاء مرتبط در سطح مشترک اتصال، متصل کند.

مولار^۲ و همکاران [۵] یک کار نوآورانه انجام دادند تا یک اتصال قوی بین دو ماده را ایجاد کنند. در این کار لایه فلزی ذوب می‌شود تا یک اتصال لحیم شده با سیم تیتانیوم ایجاد گردد. سپس الیاف با ماتریس فلز پوشانده می‌شوند و یک سازه آلومینیوم-کامپوزیت^۳ کامل را تشکیل می‌دهند که بوسیله آن ظرفیت تحمل محدود شده را از بین ببرد. پرچ خودسوراخ‌کن اجزای بالای اتصال را با کمک یک پانچ سوراخ می‌کند تا طرف مخالف، پانل‌های لبه را وقتی که از قالب استفاده می‌شود، بهم متصل کند. کل فرایند در یک عمل انجام می‌شود (شامل شکل‌دهی و سوراخ کردن) که در آن سوراخ‌های از پیش دریل شده نیاز نیستند. بنابراین نیازی به هم‌راستایی دقیق میان اجزاء و تشکیلات تنظیم پرچ نیست. از آن‌جا که اتصالات SPR به شدت وابسته به قفل شدن با ماده پایه هستند، پرچ‌ها باید برای نتایج بهینه از مقطع‌های نازک به ضخیم و از پانل‌های سخت به نرم وارد شوند [۶]. اتصالات پیچی یکی از متداول‌ترین روش‌های اتصال در بسیاری از کاربردها هستند و در اصول مشابه SPR^۴ ها که در آن یک سوراخ مشترک تک محوره در اجزاء وجود دارد که باید توسط پیچ متصل شوند. این سوراخ‌ها عموماً توسط دریل‌کاری ایجاد می‌شوند و سپس پیچ‌ها درون سوراخ از یک سمت اتصال

¹ Rhee

² Mollar

³ Carbon Fibre Reinforced Polymer

⁴ Self-piercing rivet

وارد می‌شوند و درون مهره‌ها در طرف دیگر پیچیده می‌شوند. پیچ‌ها و مهره‌ها رزوه دارند تا کمک کند که اجزای تشکیل‌دهنده اتصال را در فشار مورد نیاز با سفت کردن پیچ در یک گشتاور مناسب نگه دارد. در اتصالات پیچی تنش اعمالی به صورت تصاعدی تا تنش حداکثر در یک جابه‌جایی معین افزایش می‌یابد که با خرابی تدریجی اتصالات همراه است. مکانیزم شکست اتصال به طور کلی شکست حالت لهیدگی می‌باشد که با یک فرایند افزایش تدریجی خرابی همراه می‌شود [۷]. پرچ کردن یک روش بستن مکانیکی است. این یک فرایند اتصال سرد و مشابه اتصال پرس مکانیکی می‌باشد. مقاومت اتصال مکانیکی پرچ کردن به شدت وابسته به برش متغیر (ضخامت مواد برش خورده برای پرچ کاری) و ضخامت گردن با توجه به کاربرد است. پرچ کردن پارامترهایی مختلف با بازه‌ای گسترده دارد. بنابراین تحلیل‌هایی مانند روش تاگوچی^۱ و روش بهینه‌سازی و تحلیل المان محدود اغلب بکار گرفته می‌شوند [۸]. در روش‌های مختلف جوش کاری، می‌توان از لیزر به عنوان منبع حرارتی استفاده کرد. جوش بخاطر ذوب قطعات سفت شده شکل می‌گیرد. لیزر با سرعت ماده را حرارت می‌دهد که یک واکنش ناحیه سطح مشترک را در دماهای بسیار بالا تسهیل می‌کند. این یک روند بدون تماس است که نیازمند ورود به منطقه جوش از یک طرف قطعات در حال جوش خوردن می‌باشد. دو نوع فرایند شامل جوشکاری لیزر نفوذ عمیق و جوشکاری لیزر هدایت پرتو برای اتصال فلزات و کامپوزیت‌ها استفاده شده است [۹]. اتصال لبه‌ای اصطکاکی می‌تواند با استفاده از دستگاه جوش اصطکاکی [۱۰، ۱۱] و انرژی حرارتی تولید شده توسط اصطکاک بین ابزار دوار و سطح فلز انجام شود [۱۲]. یک ابزار با قابلیت استفاده مجدد به درون سطح ورق فلزی فشرده شده و در طول ناحیه روی هم افتاده (سطح مشترک) کشیده می‌شود. ابزار نه تنها ماده را حرارت می‌دهد تا متصل گردد، بلکه فشار را در سطح مشترک اتصال اعمال می‌کند [۱۳].

ظاهر یک اتصال لبه‌ای اصطکاکی مشابه ابزار اتصال جوش اصطکاکی است. ابزار در جوش اصطکاکی یک تیغه متحرک را با خود همراه می‌کند تا در جریان مواد کمک کند که در ابزار اتصال لبه‌ای اصطکاکی این مورد وجود ندارد [۱۳]. انتقال حرارت هدایتی از فلز حرارت دیده به جزء پلاستیکی یک ناحیه ذوب‌شده باریک در ماده‌ی پلاستیک نزدیک سطح مشترک ایجاد می‌کند. اتصال فلز و پلاستیک بعد از اینکه پلاستیک ذوب‌شده تحت فشار تولیدشده توسط تماس با زیرلایه فلز منجمد شد کامل می‌شود. با ارائه این مزایا اتصال لبه‌ای اصطکاکی پتانسیل ایجاد سطوح مشترک با مقاومت‌های اتصال بالا بدون آسیب به مواد اصلی را دارد. در مورد اتصال اصطکاکی می‌توان به نوع نقطه‌ای آن اشاره کرد که در این زمینه گوشگیر^۲ و همکاران [۱۴] ناحیه اتصال را به سه منطقه تقسیم کردند که در آن منطقه بیرونی ناحیه چسبندگی نامیده می‌شود. یک ناحیه انتقال در کنار مرز داخلی لایه منجمد شده است و ناحیه تغییر شکل یافته به صورت پلاستیک در مرکز می‌باشد. ناگاتسوکا^۳ و همکاران نشان دادند ماتریس‌های ترموپلاستیک کامپوزیت‌ها و آلیاژهای Al5052^۴ یا یک لایه اکسید شامل MgO₂ متصل می‌شوند. در این تحقیق کامپوزیت‌ها و Al5052 توسط لایه اکسید MgO متصل شدند. سنگ‌زنی سطح Al5052، هیدروکسید^۵ Al(OH)₃ ایجاد کرد و مقاومت برشی کششی اتصال لبه‌ای اصطکاکی از ۱ kN به ۲/۹ kN افزایش پیدا کرد. با این عمل‌آوری سطح که در آن مساحت سطح ثابت

¹ Taguchi

² Goushegir

³ Nagatsuka

⁴ 5052 Aluminium alloy

⁵ Aluminium hydroxide

بود، مقاومت برشی افزایش یافت [۱۳]. تحقیقات کاملی روی انواع روش‌های اتصال آلومینیوم و کامپوزیت‌های الیاف شیشه انجام شده است. اما استفاده از روش اصطکاکی که روشی نسبتاً جدیدی می‌باشد در این میان تا حدودی مغفول مانده است، به طوری که خلاءهای تحقیقاتی زیادی در این روش اتصال موجود است. یک مشکل رایج چنین اتصالی عدم وجود پیوند ساختاری فلز و کامپوزیت بین دو ماده به علت تشکیل یک اتصال چسبی در نتیجه ذوب بخشی از ماتریس‌های کامپوزیتی است. مورد بعدی نبود تحقیقاتی پیرامون شرایط اعمالی برای به دست آوردن اتصالی بهتر است. در این تحقیق مدنظر است علاوه بر مقایسه استحکام استاتیکی و دینامیکی نمونه‌های آزمایش شده، پارامترهای مختلف اثرگذار در این روش نظیر سرعت پیشروی و سرعت دورانی و نیز نیروی اعمالی در اتصال با روش اصطکاکی مورد بررسی قرار گیرد. هدف از نگارش این مقاله بررسی تجربی استحکام استاتیکی و دینامیکی آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت ترموپلاستیک الیاف شیشه در روش اتصال اصطکاکی می‌باشد.

۲- روش پژوهش

۲-۱- آماده سازی مواد

در ابتدا کامپوزیت با ماتریس پلی آمید PA6 که دارای ۲۰٪ وزنی الیاف چاپ شیشه که همان تقویت کننده کامپوزیت می‌باشد، آماده شد. فلز استفاده شده آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ می‌باشد که با توجه به کاربردی بودن آن در صنایع هوافضا و بسیاری از صنایع پیشرفته انتخاب گردید. ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر به ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ mm و ورق کامپوزیت به ضخامت ۳ میلی‌متر به ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ mm آماده شد. آلومینیوم ۵۰۵۲ موردنظر توسط یک لایه اکسیدی که از Mg و O تشکیل شده بود، به صورت آنودایز شده درآمده بودند تا از خوردگی محافظت شده و مقاومت آن در طول زمان نکاهد. این لایه اکسیدی باعث می‌شد تا اتصال Al5052/GFRTP به صورت کامل انجام نشود و اتصالات انجام شده از مقاومت بین سطحی ضعیفی در منطقه اتصال برخوردار باشند در صورتی که هدف ما بررسی استحکام اتصال در این منطقه بود و این امر موجب اخلال در بررسی مقاومت اتصال نمونه‌ها می‌شد. برای اتصالی بهتر بین Al5052/GFRTP با استفاده از برس فولادی سیمی و پولیش الماسی لایه اکسیدی را که روی آلومینیوم تشکیل شده بود تا حد زیادی برطرف گردیده و سطح موردنظر آماده اتصال شد.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم ۵۰۵۲

| سختی (HB) | ازدیاد طول (%)(50mm) | استحکام تسلیم (Mpa) | استحکام کششی (Mpa) |
|-----------|----------------------|---------------------|--------------------|
| min | Min | Min | Min Max |
| 62 | 7 | 160 | 210 260 |

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۵۲

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn |
|------|------|------|-----|-----|------|------|
| 0.09 | 0.27 | 0.03 | 0.1 | 2.8 | 0.16 | 01/0 |



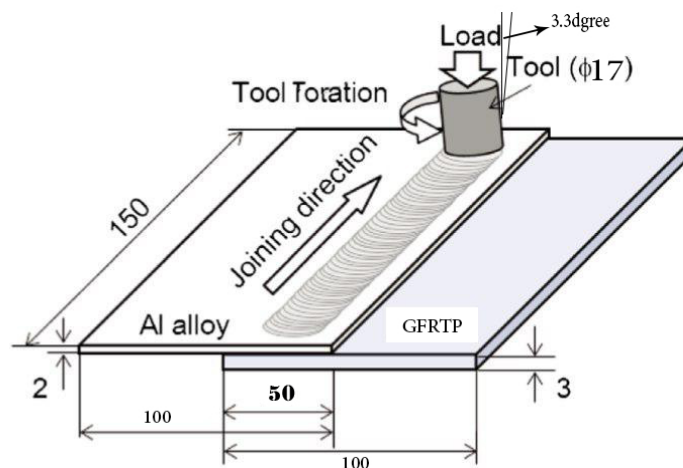
شکل ۱- ابزار بدون پین

۲-۲- آماده سازی ابزار اتصال

ابزار اتصال اصطکاکی به صورت ساده بدون پین با فولاد گرم کار h13 و با قطر شولدر ۱۷ mm به شکل (۱) ساخته شد. این ابزار توانست عمل کرد خوبی برای متصل کردن نمونه‌ها داشته باشد و تمامی نمونه بوسیله این ابزار به یکدیگر متصل شدند.

۲-۳- اتصال نمونه‌ها به روش اتصال اصطکاکی (FLJ)

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و مشخص شدن سه پارامتر مهم برای انجام آزمایش تجربی اتصال اصطکاکی لب‌به‌لب روی قید مخصوص میز کار دستگاه که از قبل به صورت استاندارد برای مهار نیروهای وارده در هنگام جوشکاری آماده بود سر جای خود مقید شدند. سپس با اعمال پارامترهای اتصال به دستگاه، نمونه‌ها با خط اتصال ۱۱۰ mm به یکدیگر متصل شدند. در شکل (۲) شماتیک کلی اتصال با جزئیات به‌طور کامل رسم شده است. سپس دستگاه نمونه‌ها را با مقادیر وارده از جداول (۱) و (۲) با سه پارامتر مختلف پس از اعمال به دستگاه به صورت شکل (۳) تحت اتصال قرارداد و نمونه‌ها مانند شکل (۴) متصل و آماده مراحل بعدی شدند.



شکل ۲- شماتیک کلی اتصال فلز به کامپوزیت



شکل ۳- نحوه انجام فرآیند اتصال



شکل ۴- خط اتصال پس از انجام فرایند

جدول ۳- پارامترهای اتصال

| عمق نفوذ (mm) | سرعت پیش روی ابزار V(mm/min) | سرعت چرخش ابزار W(rpm) | شماره نمونه | عمق نفوذ (mm) | سرعت پیشروی ابزار V(mm/min) | سرعت چرخش ابزار W(rpm) | شماره نمونه |
|---------------|------------------------------|------------------------|-------------|---------------|-----------------------------|------------------------|-------------|
| ۰/۸ | ۵۰ | ۱۳۰۰ | ۷ | ۰/۶ | ۵۰ | ۱۰۰۰ | ۱ |
| ۰/۸ | ۶۰ | ۱۳۰۰ | ۸ | ۰/۶ | ۶۰ | ۱۰۰۰ | ۲ |
| ۰/۸ | ۸۰ | ۱۳۰۰ | ۹ | ۰/۶ | ۸۰ | ۱۰۰۰ | ۳ |
| ۰/۸ | ۵۰ | ۱۰۰۰ | ۱۰ | ۰/۶ | ۵۰ | ۱۳۰۰ | ۴ |
| ۰/۸ | ۶۰ | ۱۰۰۰ | ۱۱ | ۰/۶ | ۶۰ | ۱۳۰۰ | ۵ |
| ۰/۸ | ۸۰ | ۱۰۰۰ | ۱۲ | ۰/۶ | ۸۰ | ۱۳۰۰ | ۶ |
| ۰/۸ | ۵۰ | ۷۲۰ | ۱۶ | ۰/۶ | ۵۰ | ۷۲۰ | ۱۳ |
| ۰/۸ | ۶۰ | ۷۲۰ | ۱۷ | ۰/۶ | ۶۰ | ۷۲۰ | ۱۴ |
| ۰/۸ | ۸۰ | ۷۲۰ | ۱۸ | ۰/۶ | ۸۰ | ۷۲۰ | ۱۵ |

نمونه‌های جوش خورده با استاندارد مخصوص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحت عنوان ASWD17.3/D17.3M:2010 به صورت استاندارد به عرض جوش ۲/۴mm و طول ۱۵۰mm به صورت شکل (۵) برش خورده و آماده تست‌های نهایی گشتند.



شکل ۵- نمونه جوش خورده به صورت استاندارد با عرض جوش ۲/۴mm و طول ۱۵۰mm

۲-۴- نحوه انجام آزمایش

با استفاده از تست کشش می توان درباره‌ی خواص ماده تا حد زیادی آشنا شد. وقتی به کشیدن قطعه تا زمان شکست ادامه داده شود، به مشخصات کششی خوب و کاملی پی می‌بریم. حداکثر تنش در این آزمون بسیار مهم بوده و معمولاً در نمودار، استحکام نهایی یا UTS^۱ نامیده می‌شود. این آزمون با دستگاه SAF-50 خستگی محوری ۵ تن به همراه فک دینامیک HWGD-50 با گیرش هیدرولیکی انجام شد. هر یک از نمونه‌ها با دقت به فک هیدرولیکی دستگاه بسته شدند و تست مربوط به کشش آن‌ها با سرعت (۱ mm/min) یک‌به‌یک تا شکست نهایی به شکل (۶) انجام شد. آزمون تست خستگی هم با دستگاه SAF-50 که قبلاً تست استاتیکی به وسیله آن انجام گرفته بود، انجام شد. نمونه‌ها پس از اینکه در فک دستگاه بسته شدند، تحت نیروی سینوسی با حد پایین ۱ MPa و حد بالای ۳ MPa و فرکانس ۱۰ Hz قرار گرفتند (بارگذاری دینامیکی کشش-کشش) و استحکام اتصال آن‌ها تحت بارگذاری تناوبی بررسی شد.



شکل ۶- نحوه انجام آزمایش تست کشش

^۱ Ultimate Tensile Strength

۳- بررسی نتایج

۳-۱- بررسی نتایج پس از آماده سازی سطح و زاویه ابزار

پس از سایش سطح آلومینیوم با برس فولادی سیمی و پولیش الماسی لایه اکسیدی را که روی آلومینیوم تشکیل شده بود تا حد زیادی برطرف کرده و سطح موردنظر آماده اتصال شد. سپس سطح موردنظر از قسمت ساییده شده روی سطح مشترک اتصال GFRT/TP قرار گرفت این کار باعث شد تا نمونه‌ها به شکل کاملاً بهتری در ناحیه اتصال به‌هم متصل شوند و مقاومت برشی اتصالات در تست‌های کشش افزایش پیدا کند. این کار نشان می‌دهد آماده‌سازی سطوح از حیث بررسی استحکام دارای اهمیت بوده و ساییدن Al5052 که مقدم بر اتصال صورت می‌گیرد مقاومت اتصال را افزایش می‌دهد. ابزار پین دار برای اتصال اصطکاکی باعث پیدایش عیب تونل و مشکلات ناشی از آن می‌شد؛ بنابراین به‌منظور برطرف کردن این مشکل ساخت ابزار دیگری در دستور کار قرار گرفت این ابزار بدون پین با قطر شانه ۱۷ mm ساخته شد. به‌منظور پیشروی بهتر و برطرف کردن حرارت اضافه، ابزار تحت زاویه ۳/۳ درجه نمونه‌ها را متصل کرد که نمونه‌های متصل شده همانند شکل (۸) خطوط جوش منظم و قابل قبولی داشتند.

۳-۲- بررسی استحکام اتصالات به‌وسیله تست‌های استاتیکی

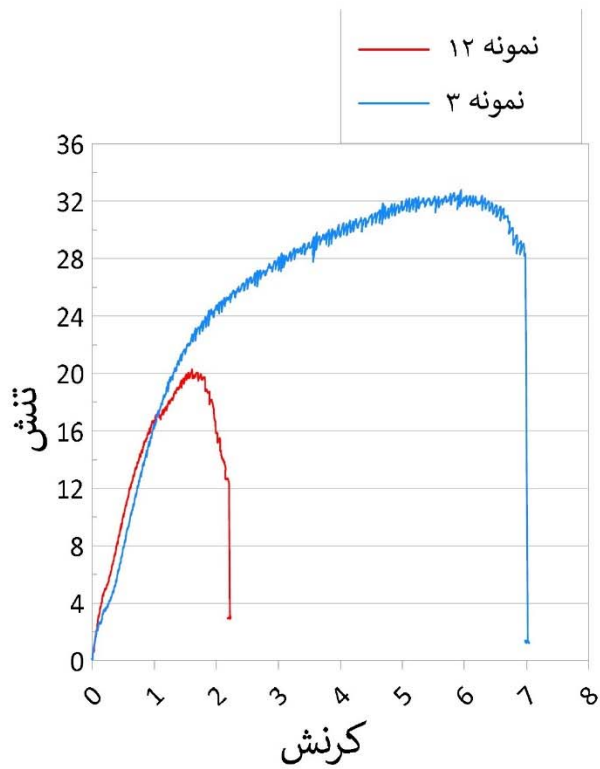
با افزایش عمق نفوذ ابزار از ۰/۶ mm به ۰/۸ mm که به‌صورت پلانچ تعریف می‌شود، استحکام اتصال تحت تأثیر قرار گرفت. نمونه‌هایی که در عمق بیشتر به هم متصل شده بودند، نسبت به نمونه‌هایی که با عمق پلانچ کمتر یعنی ۰/۶ mm به هم متصل شده بودند، دارای استحکام نهایی اتصال کمتری بودند؛ و نمونه‌های با نیروی عمودی کمتر دارای استحکام بهتری در تست‌های انجام شده بودند.



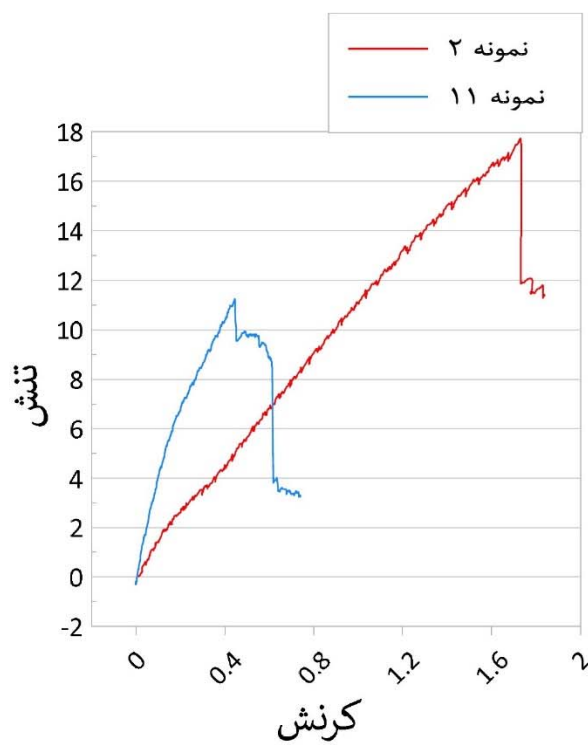
شکل ۸- اثر اصلاح ابزار و زاویه بر روی خط اتصال

البته این مهم متأثر از دو پارامتر دیگر یعنی نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار هم است، به طوری که در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 80 mm/min تنش برشی نهایی 33 MPa و در عمق نفوذ $0/8$ mm با سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 80 mm/min تنش نهایی استحکام 60 MPa بود (شکل ۹-الف). در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 60 mm/min تنش نهایی برشی $17/5$ MPa و در عمق نفوذ $0/8$ mm، سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 60 mm/min تنش نهایی برشی به 12 MPa کاهش یافت (شکل ۹-ب). در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1300 rpm و نرخ پیشروی 80 mm/min استحکام نهایی کششی $25/5$ MPa در عمق نفوذ $0/8$ mm با سرعت دورانی 1300 rpm و نرخ پیشروی 80 mm/min استحکام نهایی کششی به 24 MPa کاهش یافت (شکل ۹-ج). در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1300 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min استحکام نهایی کششی 40 MPa بود که در عمق نفوذ $0/8$ mm با سرعت دورانی 1300 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min استحکام نهایی کششی به 30 MPa کاهش یافت (شکل ۹-د). در عمق نفوذ $0/6$ mm و با سرعت دورانی 720 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min استحکام نهایی کششی 28 MPa و با عمق نفوذ $0/8$ mm و با سرعت دورانی 720 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min استحکام نهایی کششی به $16/5$ MPa کاهش یافت (شکل ۱۰).

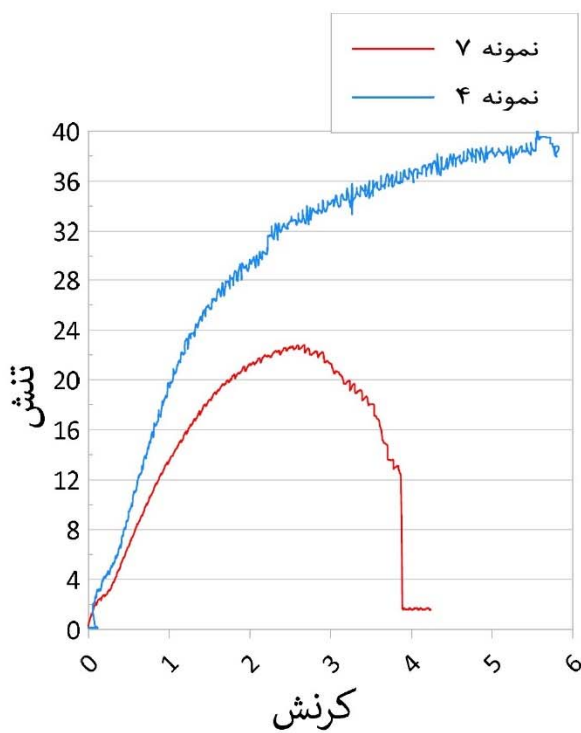
نتایج نشان می‌دهند که استحکام کششی نهایی نمونه‌ها با افزایش نرخ پیشروی دستگاه افزایش پیدا کرده است، به طوری که در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 60 mm/min و 80 mm/min به ترتیب استحکام نهایی کششی از $17/5$ به 33 MPa افزایش پیدا کرد (شکل ۱۱-الف). در عمق نفوذ $0/8$ mm با سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 60 mm/min و 80 mm/min به ترتیب استحکام کششی از 12 MPa به 20 MPa افزایش پیدا کرد (شکل ۱۱-ب). در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1300 rpm و نرخ پیشروی 60 mm/min و 80 mm/min به ترتیب استحکام نهایی کششی از $18/5$ به $25/5$ MPa افزایش پیدا کرد (شکل ۱۱-ج). در عمق نفوذ $0/8$ mm با سرعت دورانی 1000 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min و 60 mm/min به ترتیب استحکام نهایی کششی از 23 MPa و 30 MPa بود (شکل ۱۱-د). در عمق نفوذ $0/6$ mm با سرعت دورانی 1300 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min و 60 mm/min به ترتیب استحکام نهایی کششی از 28 MPa به 40 MPa افزایش یافت (شکل ۱۲-الف). در عمق نفوذ $0/8$ mm و با سرعت دورانی 720 rpm و نرخ پیشروی 50 mm/min و 60 mm/min به ترتیب استحکام نهایی کششی از $16/5$ MPa به 30 MPa افزایش پیدا کرد (شکل ۱۲-ب).



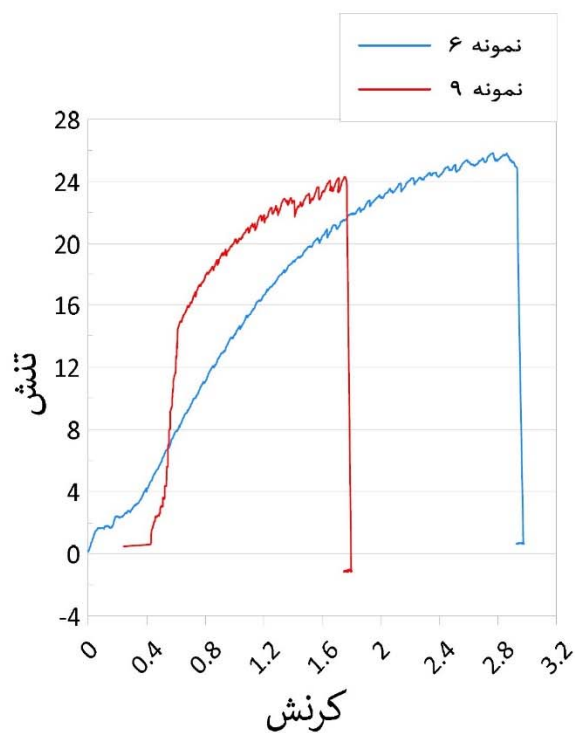
ب



الف

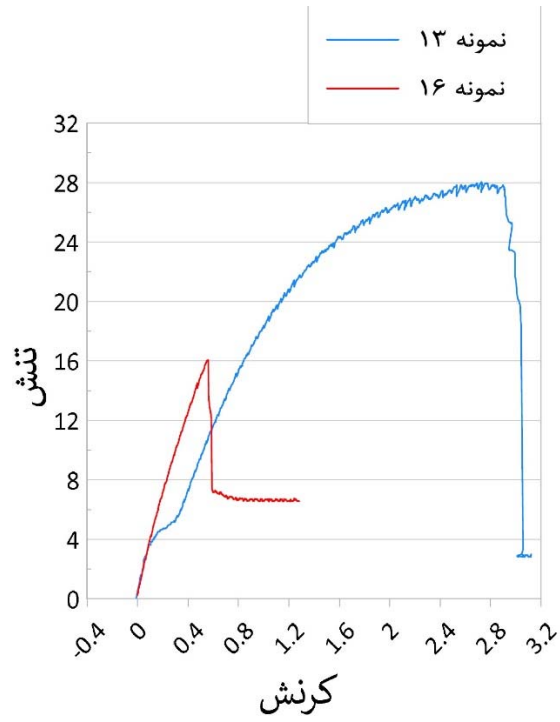


د

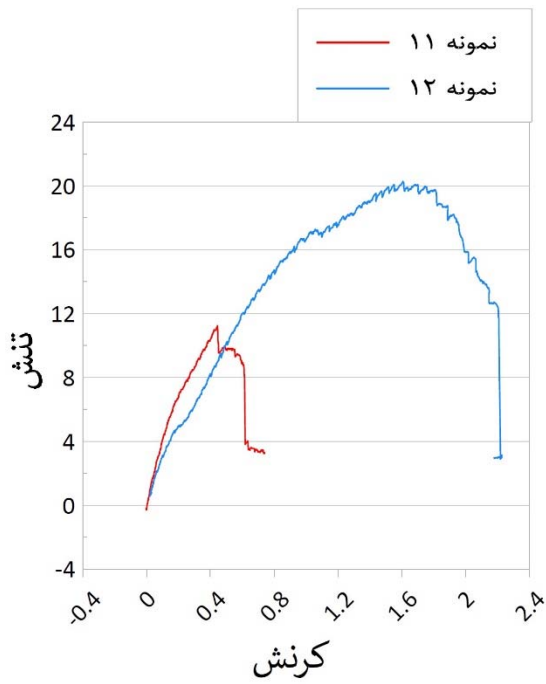


ج

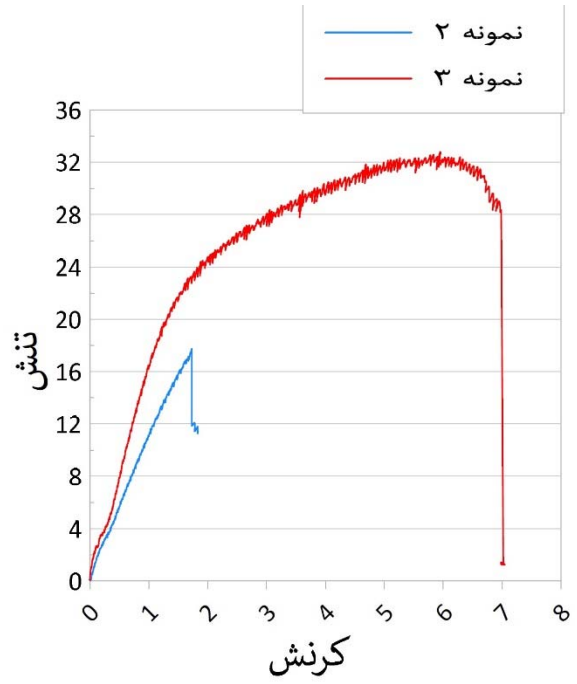
شکل ۹- تاثیر پارامتر عمق نفوذ بر استحکام کششی نهایی



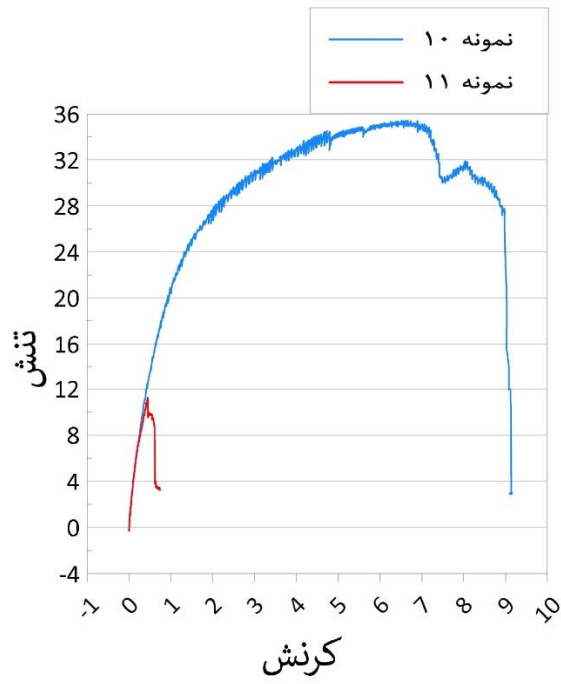
شکل ۱۰- تاثیر پارامتر عمق نفوذ بر استحکام کششی نهایی



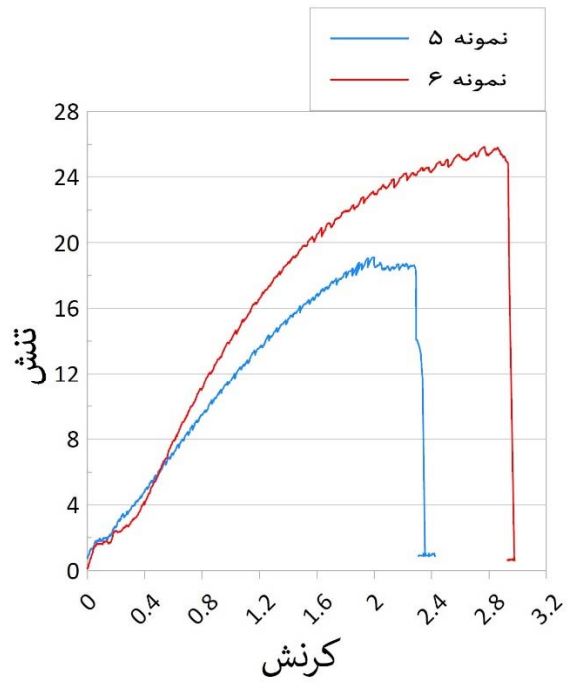
ب



الف

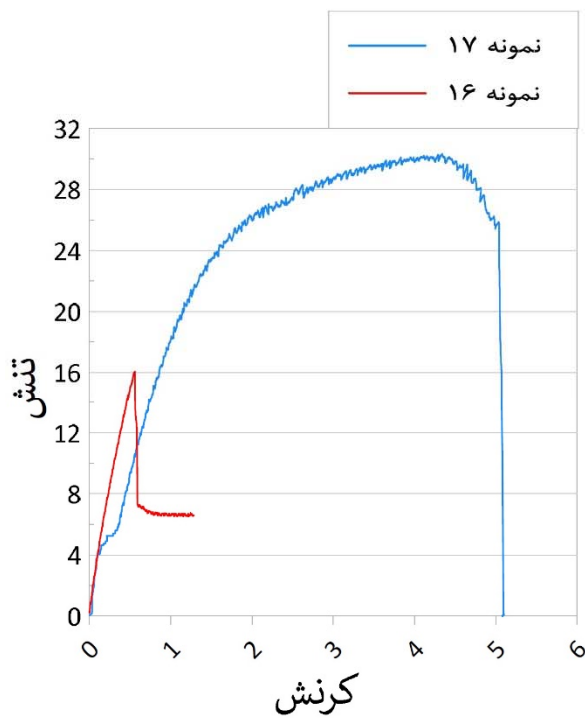


د

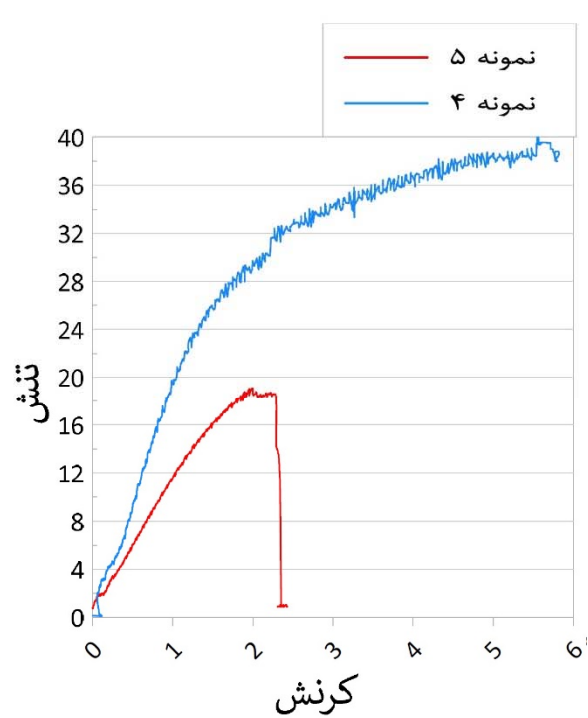


ج

شکل ۱۱- تاثیر پارامتر نرخ پیشروی بر استحکام کششی نهایی



ب

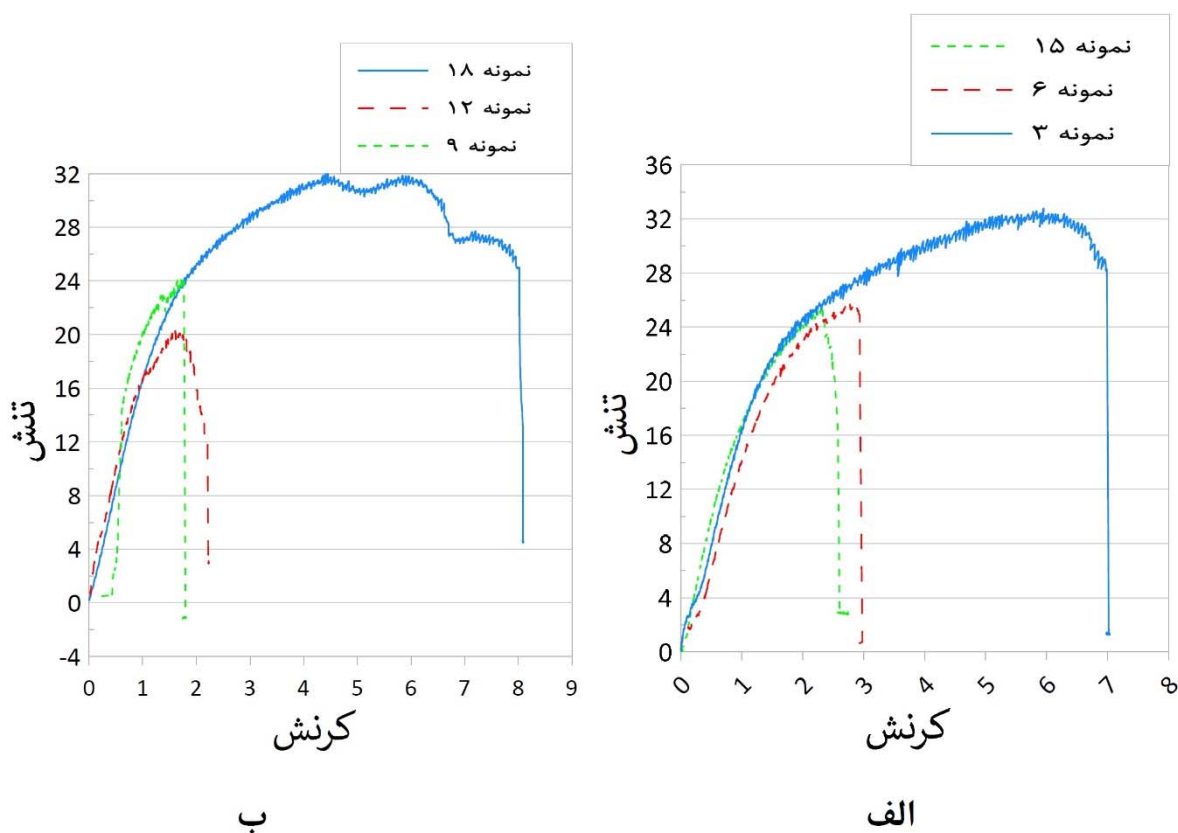


الف

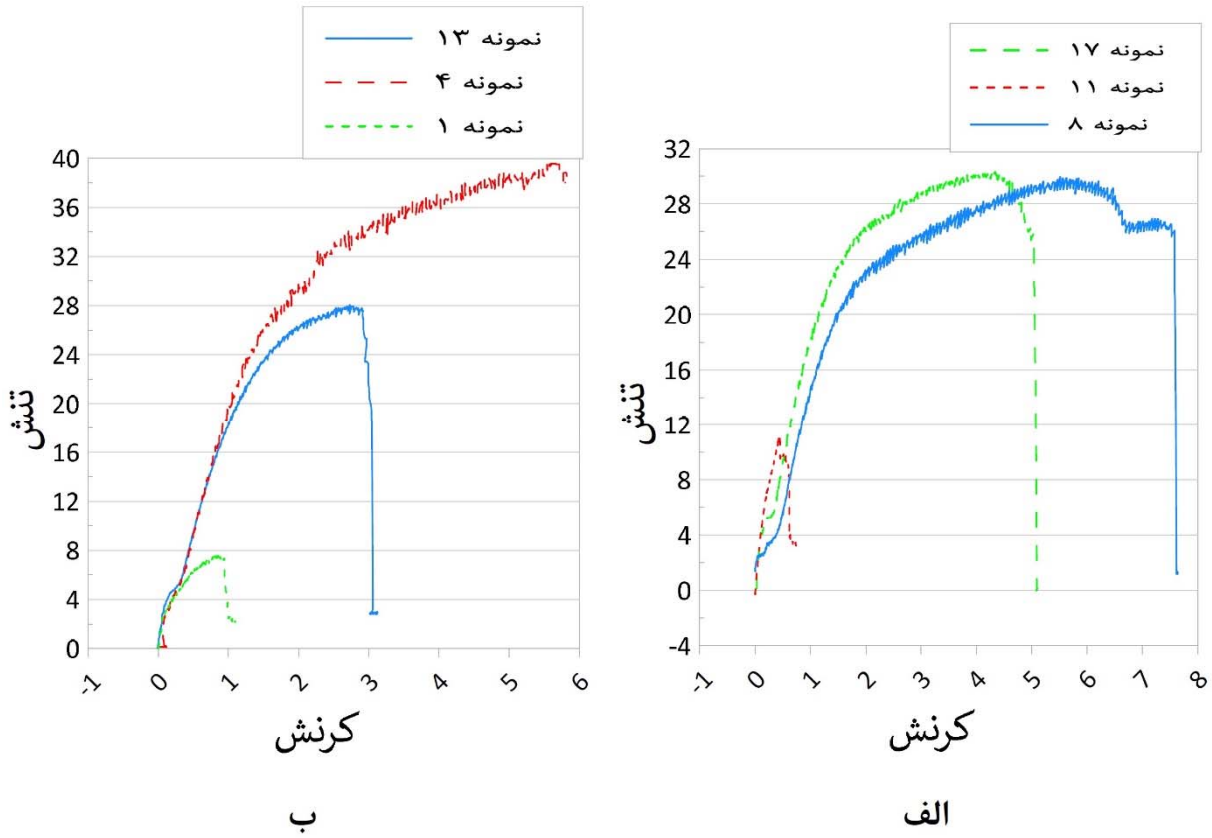
شکل ۱۲- تاثیر پارامتر نرخ پیشروی بر استحکام کششی نهایی

پارامتر بعدی که جزو پارامترهای مهم مورد بررسی بود، اثر نرخ سرعت دورانی بر روی استحکام اتصالات است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در عمق نفوذ ۰/۶ mm با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و ۱۳۰۰ rpm و ۷۲۰ rpm با نرخ پیشروی ۸۰ mm/min استحکام کششی نهایی به ترتیب ۳۳ MPa، ۲۵/۵ MPa و ۲۵ MPa می‌باشد (شکل ۱۳-الف). در عمق نفوذ ۰/۸ mm با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و ۱۳۰۰ rpm و ۷۲۰ rpm با نرخ پیشروی ۸۰ mm/min استحکام کششی نهایی به ترتیب ۲۰ MPa، ۲۴/۵ MPa و ۳۱ MPa است (شکل ۱۳-ب). در عمق نفوذ ۰/۸ mm با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و ۱۳۰۰ rpm و ۷۲۰ rpm با نرخ پیشروی ۶۰ mm/min استحکام کششی نهایی به ترتیب ۱۲ MPa، ۳۰ MPa و ۳۰/۵ MPa می‌باشد (شکل ۱۴-الف). همچنین در عمق نفوذ ۰/۶ mm با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و ۱۳۰۰ rpm و ۷۲۰ rpm با نرخ پیشروی ۵۰ mm/min استحکام کششی نهایی به ترتیب ۷/۸ MPa، ۴۰ MPa و ۲۸ MPa است (شکل ۱۴-ب).

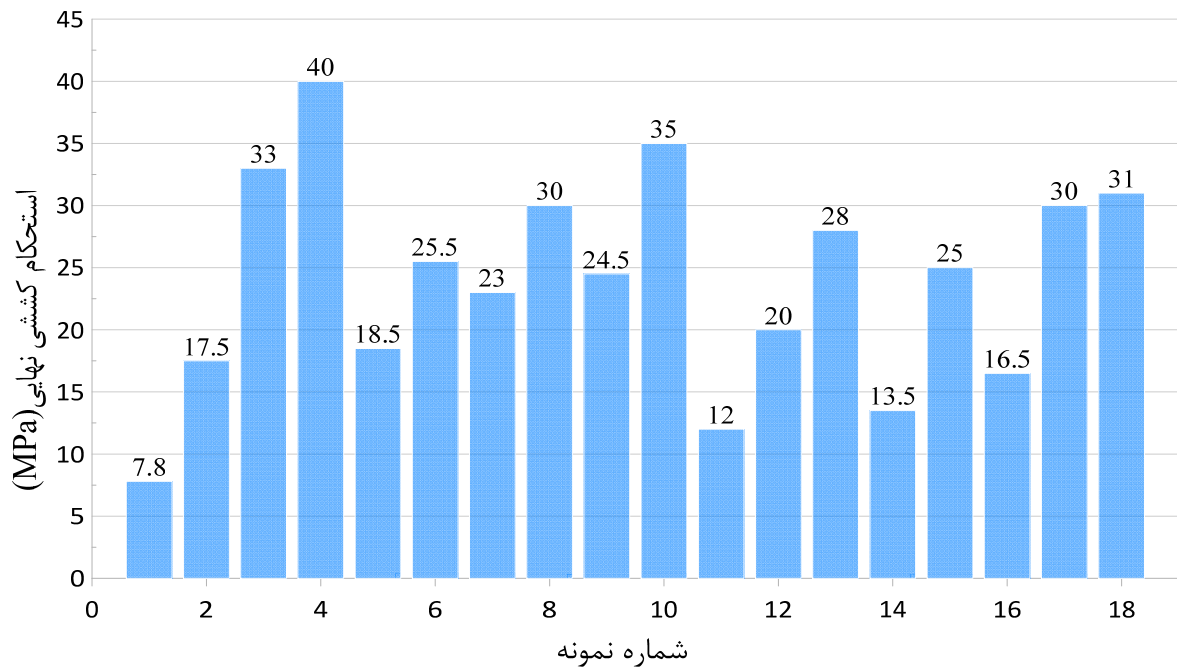
استحکام اتصالات متأثر از سه پارامتر عمق نفوذ و نرخ جابه‌جایی (سرعت پیشروی ابزار) و سرعت دورانی در شکل (۱۵) نسبت به هم مقایسه شدند. تقریباً تمامی اتصالات در فصل مشترک اتصال بین AL5052/GFRTP شکستند که حداقل، این شکست در بخشی از کامپوزیت هم اتفاق افتاد که از دلایل آن وجود تخلخل و ایجاد حباب در زیر ورق آلومینیوم که در واقع در فصل مشترک اتصال آن‌ها بود، رخ داد. در تصویر میکروسکوپی شکل (۱۶) وجود این تخلخل و حباب‌ها در نمونه‌های تست شده پس از شکست مشخص هستند.



شکل ۱۳- تاثیر پارامتر سرعت دورانی بر استحکام کششی نهایی



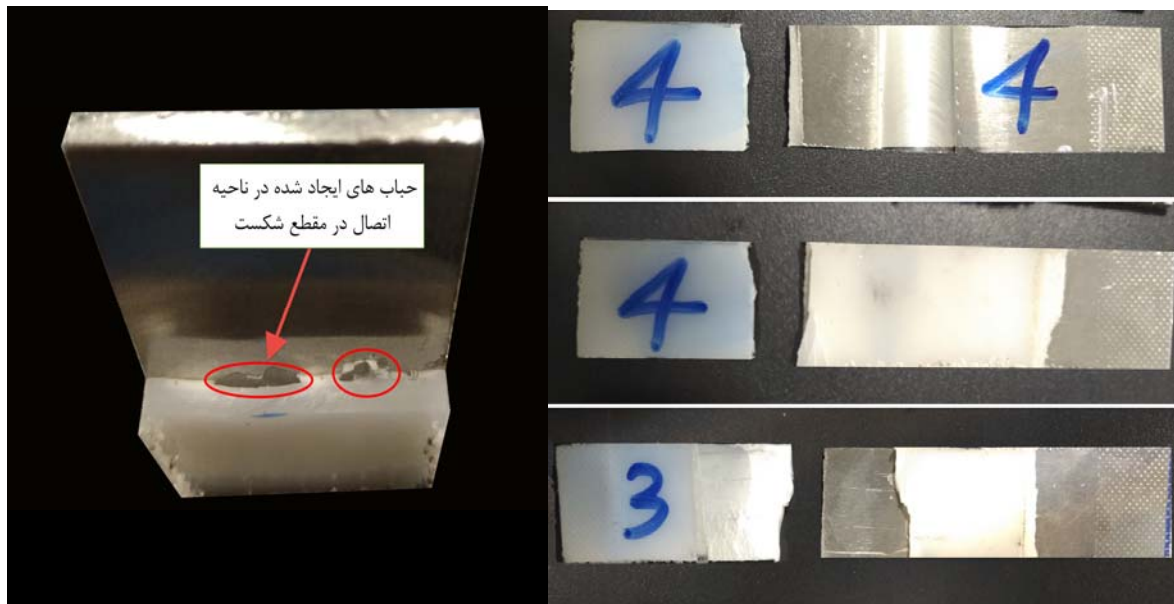
شکل ۱۴- تاثیر پارامتر سرعت دورانی بر استحکام کششی نهایی



شکل ۱۵- استحکام نهایی کششی نمونه ها



شکل ۱۶- حباب‌های شکل گرفته در فصل مشترک اتصال



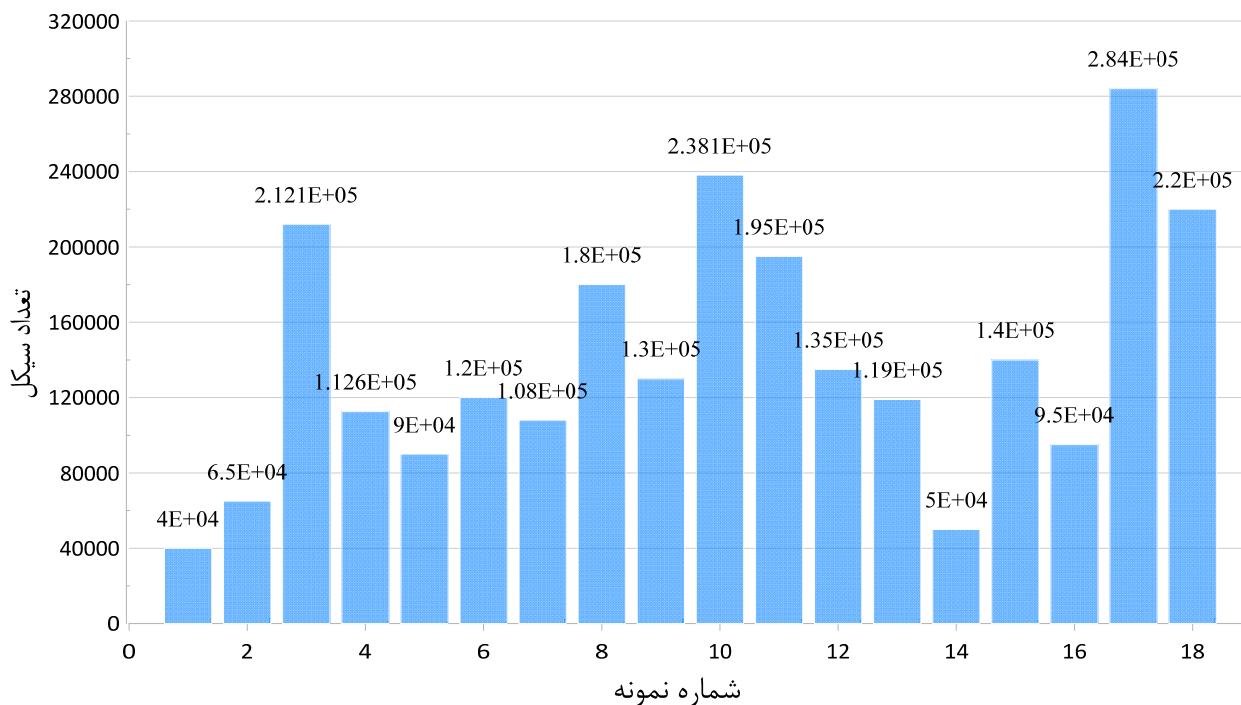
شکل ۱۷- شکست کامپوزیت در نمونه‌های با اتصال مقاوم

در بعضی نمونه‌ها که استحکام کششی آن‌ها بالاتر از 30 MPa بود، شکست از بخشی از ناحیه اتصال بود. به طوری که در شکل (۱۷) مشخص است، بیشتر ناحیه اتصال هنوز باقی است و در قسمتی که نازک‌شدگی و رشد ترک به علت حرارت و وجود حباب‌ها اتفاق افتاده، این شکست رخ داده است. این شکست به طور کامل در فصل مشترک نبوده و نشان‌دهنده مقاومت قابل قبول اتصال است.

۳-۳- بررسی نتایج حاصل از تست‌های دینامیکی

این آزمون با کشش 1 MPa به صورت حد پایین خستگی و با کشش 10 MPa به صورت حد بالای خستگی و با فرکانس 10 Hz انجام شد. نمودارهای به دست آمده به صورت سینوسی بودند به طوری که هر دوره تناوب (هر تکرار سینوس) نماینده هزار سیکل بود. مقدار فرکانس دستگاه به صورت استاندارد 10 Hz اعمال شد تا

شرایط آزمایش با فرکانس بالاتر از ۱۰ Hz که حالتی بسیار مصنوعی شکل و غیرطبیعی تر می‌شد پیدا نکند. در این حالت مقدار نیروی اعمالی از طرف دستگاه به نمونه‌ها که به صورت کشش-کشش بود بسیار سریع‌تر می‌شد. نمونه‌ها به‌دقت تحت تست قرار گرفتند و پس از اتمام تست‌های مورد نظر برای مقایسه استحکام نمونه‌ها در تست خستگی داده‌ها به شرح شکل (۱۸) بودند:



شکل ۱۸- داده‌های حاصل از تست دینامیکی



شکل ۱۹- شکست در نمونه‌های با استحکام اتصال بالا تحت بارگذاری دینامیکی

نمونه‌هایی که استحکام اتصال آن‌ها مستحکم‌تر از باقی نمونه‌ها بود و سیکل‌های بالای دوره تناوب، بالاتر از 100 MPa تا 284 MPa را به خود اختصاص دادند، شکست در آن‌ها به صورت شکست چقرمه در خود ماتریس ترموپلاست پلی آمید PA6 به شکل (۱۹) بود. به طوری که مقاومت اتصال آن‌ها بالاتر از مقاومت خود قطعات متصل شده اصلی بود.

۴- جمع‌بندی نتایج

اتصال لب‌به‌لب اصطکاکی بین فلز AL5052 و کامپوزیت GFRTTP ترموپلاست با ۲۰٪ وزنی الیاف شیشه با اعمال پارامترهای نوع ابزار و سرعت پیشروی ابزار و سرعت دورانی ابزار و عمق نفوذ انجام شد؛ و با انجام تست‌های استاتیکی و دینامیکی بر روی هر یک از نمونه‌ها، نتایج زیر حاصل شد:

- GFRTTPها باید از ماتریس‌های ترموپلاست ساخته شوند تا از طریق اتصال لب‌به‌لب اصطکاکی حرارتی متصل شوند. این اتصال به دلیل ذوب بخشی از ماتریس‌های ترموپلاست در اثر عبور از درجه ذوب و سپس منجمد شدن آن در سطوح مشترک اتصال رخ می‌دهد.

- انتقال حرارت هدایتی از فلز حرارت دیده به جزء پلاستیکی یک ناحیه ذوب‌شدگی باریک در ماده پلاستیکی ایجاد می‌کند که اندازه ضخامت این ناحیه به عمق نفوذ و سرعت جابه‌جایی ابزار وابسته است. اتصال فلز و کامپوزیت بعد از اینکه رزین با رسیدن به نقطه ذوب به صورت مذاب درآمد توسط تماس با زیر لایه فلز منجمد شده و به صورت کامل درمی‌آید.

- اتصال لب‌ای اصطکاکی بین فلز و کامپوزیت GFRTTP ظرفیت پتانسیل ایجاد سطوح مشترک اتصال با ایجاد مقاومت بالا بدون آسیب رساندن به قطعات اصلی را دارد.

- استفاده از ابزار پین‌دار در این روش باعث ایجاد عیب تونل و در نتیجه ایجاد اتصال ضعیف خواهد شد. برای افزایش استحکام اتصال در این روش، ابزار مورد استفاده باید از نوع بدون پین باشد. همچنین زاویه ابزار باعث پیشروی بهتر آن و دفع حرارت اضافه خواهد شد.

- آماده‌سازی سطح به‌وسیله سایش باعث افزایش مقاومت اتصال و افزایش استحکام کششی نهایی می‌شود.

- هر سه پارامتر نرخ پیشروی و سرعت دورانی و عمق نفوذ بر روی استحکام اتصال مؤثرند، به نحوی که برای به دست آوردن استحکام موردنظر می‌توان هر سه پارامتر را تغییر داد.

- نتایج نشان داد با کاهش عمق نفوذ به 0.6 mm بیشترین استحکام کششی حاصل شد.

- با توجه به نتایج حاصل شده با افزایش سرعت پیشروی استحکام کششی افزایش پیدا کرد.

- در سرعت دورانی متوسط (1000 rpm) استحکام کششی افزایش یافت.

- تأثیرگذارترین دلیل بر روی استحکام اتصالات دمای وارد شده به رزین کامپوزیت به دلیل حرارت تولیدی توسط اصطکاک بین ابزار و فلز در نتیجه اثرگذاری سرعت و نرخ پیشروی هنگام اتصال و همچنین عمق نفوذ ابزار است. افزایش بیش از حد دمای ورودی موجب نازک شدن زیاد لایه GF RTP در سطح مشترک اتصال شده و این نازک شدن در سطح مشترک ماتریس باعث کاهش استحکام اتصالات می‌گردد.
- نمونه‌هایی که در عمق بیشتر از ۰/۸ mm به هم متصل شده بودند، نسبت به نمونه‌هایی که با عمق پلانچ^۱ کمتر یعنی ۰/۶ mm به هم متصل شدند، دارای استحکام نهایی اتصال کمتری بودند.
- بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه شماره ۴ با عمق نفوذ ۰/۶ mm و سرعت دورانی ۱۳۰۰ rpm و نرخ پیشروی ۵۰ mm/min بود.
- مقاومت کششی حداکثر در محل اتصال در کشش کمتر از مقاومت کششی خود نمونه‌ها می‌باشد که دلیل آن ذوب قسمتی از ماتریس‌های پلیمری است که در نتیجه آن بدتر شدن جهت‌گیری الیاف شیشه و تولید حفره در منطقه اتصال در GF RTP و دلیل بعدی نازک شدن کامپوزیت در ناحیه سطح مشترک اتصال هست.
- تقریباً تمامی اتصالات در فصل مشترک اتصال بین AL5052/GF RTP شکستند. حداقل این شکست در بخشی از GF RTP هم رخ می‌داد که از دلایل آن وجود تخلخل و ایجاد حباب‌ها در زیر ورق آلومینیوم که در فصل مشترک اتصال بود، می‌باشد.
- نمونه‌هایی که استحکام کششی آن‌ها بیش از سایر نمونه‌ها بود در منطقه اتصال مقاومت خوبی داشتند و شکست آن‌ها به صورت شکست کامپوزیت در منطقه اتصال بود. دلیل این موضوع وجود حباب‌های ایجاد شده به دلیل حرارت بالای تولیدی توسط اصطکاک بین ابزار و آلومینیوم هست که علت آن عبور از منطقه ذوب و بالتبع شروع فعل و انفعالات شیمیایی حاصل از ذوب رزین پلی‌آمید است.
- شکست در نمونه‌های تست شده به وسیله آزمایش تست خستگی با سیکل‌های بالای ۱۰۰۰۰۰ به صورت شکست چقرمه در قطعه کامپوزیت به صورت گلوبی شکل رخ داد. سه عامل برای این نوع شکست وجود داشت، عامل اول نوع ساختار شیمیایی ماتریس PA6 مورد استفاده که به صورت نیمه کریستالی و با ساختاری سخت و چقرمه بود. عامل دوم حرارت ایجاد شده به دلیل تنش‌های متناوب و پی‌درپی در ماتریس پلیمری و عامل سوم به دلیل استحکام ضعیف‌تر کامپوزیت نسبت به خود اتصال و استحکام آلومینیوم بود که باعث آغاز شکست در قطعه اصلی کامپوزیت شد. البته استحکام کامپوزیت می‌تواند متأثر از حرارت وارده از سمت سطح مشترک اتصال به ماتریس پلیمری نیز باشد.

¹ Plunge

- نمونه‌ای که بیشترین حد تحمل خستگی را به خود اختصاص داد، نمونه شماره ۱۷ با تعداد ۲۸۴۰۰۰ سیکل است که در تست‌های استاتیکی استحکام نهایی کششی آن ۳۰MPa بود.
 - مقاوم‌ترین نمونه در تست‌های استاتیکی نمونه شماره ۴ با عمق نفوذ ۰/۶ mm و سرعت دورانی ۱۳۰۰ rpm و نرخ پیشروی ۵۰ mm/min بود، اما این دلیلی برای برتری این نمونه از نظر تعداد سیکل‌های قابل تحمل در تست‌های دینامیکی نیست، به طوری که تعداد سیکل‌های به دست آمده در نمونه شماره ۴، ۱۱۲۵۵۸ عدد است و نسبت به نمونه ۱۷ که دارای ۲۸۴۰۰۰ سیکل بود، تعداد سیکل و مقاومت کمتری را ثبت کرد. از دلایل اصلی این موضوع تفاوت در اتصال نمونه‌ها با مقدار حرارت تولیدی متفاوت است که توسط ایجاد اصطکاک با پارامترهای مختلف به وجود آمده می‌باشد. این حرارت در ماتریس پلیمری تأثیرگذار است. با بررسی تعداد سیکل‌ها و نوع شکست نمونه‌ها در تست‌های خستگی به این نتیجه می‌رسیم که اتصال AL5052/GFRTP تحت بارگذاری متناوب دارای استحکام قابل قبولی می‌باشد.
- در مجموع با تغییر پارامترهای سرعت پیشروی و عمق نفوذ و سرعت دورانی به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش سرعت پیشروی دستگاه از ۵۰ mm/min به ۸۰ mm/min استحکام نهایی کششی نمونه‌ها افزایش پیدا کرد و این افزایش سرعت بر روی استحکام نمونه‌ها اثر مثبت داشت. در مورد عمق نفوذ با کاهش عمق نفوذ از ۰/۸ به ۰/۶ استحکام نمونه‌ها افزایش پیدا کرد و نتیجه مثبت بود، اما در مورد کاهش یا افزایش سرعت دورانی بر روی استحکام نمونه‌ها نمی‌توان به طور قطع اظهار نظر کرد و دلیل آن تأثیر هر سه پارامتر و مقدار گرمای منتقل شده در اثر دوران ابزار می‌باشد.

مراجع

- [1] F. C. Campbell Jr, "*Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*", Elsevier, New York, USA, (2011).
- [۲] ف. غروی، ا. ابراهیم زاده و ع. سهیلی، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت‌های پیشروی متفاوت"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، شماره دوم، ص ۲۹، تابستان (۱۳۹۵).
- [3] Groche, P., Wohletz, S., Brenneis, M., Pabst, C., and Resch, F., "Joining by Forming-A Review on Joint Mechanisms, Applications and Future Trends", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 10, pp. 1972-1994, (2014).
- [4] Pramanik, A., "Developments in the Non-traditional Machining of Particle Reinforced Metal Matrix Composites", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 86, pp. 44-61, (2014).
- [5] Möller, F., Thomy, C., Vollertsen, F., Schiebel, P., Hoffmeister, C., and Herrmann, A., "Novel Method for Joining CFRP to Aluminium", *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 37-45, (2010).

- [6] Li, D., Chrysanthou, A., Patel, I., and Williams, G., "Self-piercing Riveting-A Review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, No. 5-8, pp. 1777-1824, (2017).
- [7] Kweon, J.H., Jung, J. W., Kim, T. H., Choi, J. H., and Kim, D. H., "Failure of Carbon Composite-to-Aluminum Joints with Combined Mechanical Fastening and Adhesive Bonding", *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 192-198, (2006).
- [8] Lee, C. J., Kim, J. Y., Lee, S. K., Ko, D. C., and Kim, B. M., "Design of Mechanical Clinching Tools for Joining of Aluminium Alloy Sheets", *Materials & Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 1854-1861, (2010).
- [9] Tan, X., Zhang, J., Shan, J., Yang, S., and Ren, J., "Characteristics and Formation Mechanism of Porosities in CFRP During Laser Joining of CFRP and Steel", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 70, pp. 35-43, (2015).
- [10] Chen Y., and Nakata, K., "Friction Stir Lap Joining Aluminum and Magnesium Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 6, pp. 433-436, (2008).
- [۱۱] م. کثیری و ک. امینی، م. صادقی گوغری، "بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال غیر همجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، ص ۲۵۷-۲۶۶، پاییز (۱۳۹۴).
- [12] Thomas, W., and Nicholas, E., "Friction Stir Welding for the Transportation Industries", *Materials & Design*, Vol. 18, No. 4-6, pp. 269-273, (1997).
- [13] Nagatsuka, K., Yoshida, S., Tsuchiya, A., and Nakata, K., "Direct Joining of Carbon-fiber-reinforced Plastic to an Aluminum Alloy using Friction Lap Joining", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 73, pp. 82-88, (2015).
- [14] Goushegir, S., Dos Santos, J., and Amancio-Filho, S., "Friction Spot joining of Aluminum AA2024/carbon-fiber Reinforced Poly (Phenylene Sulfide) Composite Single Lap Joints: Microstructure and Mechanical Performance", *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 54, pp. 196-206, (2014).

Abstract

Combination of metal and composites are frequently used in manufacturing structures. Therefore it is a great importance to join these mat ends composite and metals strongly. This joint between metals and composites plays a key role in hybrid designs. Hybrid design is a newly appearing process for joining metals and composites, which have special and demanding properties, such as higher strength, higher resistance to radiation and compatible design, etc. In the present study, which is an experimental investigation of joining metals and composites using friction lab joining (FLJ) method the composite is made up glass fibers, polymer PA6 as Thermoplastic and 20% weighs glass fiber. Aluminum alloy (AL 5052) is used as metal.

The goal of this study is to explore the strength of joint between composite and metal, which is made using FLJ in two different ways (static and dynamic). During the study, progress rate, spinning speed and depth of penetration are parameters to be considered as effective on the joint strength. The results showed that the joint properties and strength was affected by all 3 mentioned Parameters, in which, when the penetration depth decreases and normal spinning speed and progress rate increases, the most efficient joint properties (strength) has been obtained. As pressure and temperature increases in the joining area, GFRTTP gets thinner and the joint becomes weaker. Due to porosity and voids in the joining area the joint can be failed. The strength of joints in specimen showed a good result in fatigue test. In 72% of the fatigue test the failure occurred in composite itself not in joint between AL5052/GFRTTP.