



تحلیل خواص مکانیکی، شکست‌نگاری و ریزساختار کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم/مس تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

داود رحمت آبادی^۱، مسلم طیبی^۲، رامین هاشمی^{۳*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* rhashemi@iust.ac.ir, 16846-13114

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۷/۱۸
پذیرش: ۹۵/۹/۱۵

کلیدواژگان:

کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم/مس
پیوند سرد نوردی
خواص مکانیکی
شکست‌نگاری و ریزساختار

چکیده

در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های لایه‌ای مورد توجه بسیاری از محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. یکی از روش‌های تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای روش پیوند سرد نوردی می‌باشد که نسبت به سایر روش‌های تولید کامپوزیت از لحاظ اقتصادی به‌صرفه می‌باشد و قابلیت تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای با جنس‌های مختلف را دارد. در این پژوهش کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم/مس با استفاده از روش پیوند نوردی در دمای اتاق، بدون استفاده از روانکار و با استفاده از یک ماشین نورد آزمایشگاهی با اعمال کاهش ضخامت 60% تولید شد. همچنین خواص مکانیکی، شکست‌نگاری و ریزساختار با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره، میکروسختی، عکس‌برداری از سطح مقطع شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده حاکی از افزایش استحکام و میکروسختی برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیم/مس نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیم 5052 و مس خالص می‌باشد که عامل اصلی این افزایش اعمال کرنش زیاد و کار سرد می‌باشد. استحکام کششی برای نمونه‌ی تولید شده به 415 مگاپاسکال می‌رسد که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیم و مس به ترتیب 48% و 140% افزایش می‌یابد. همچنین میکروسختی برای هر لایه به‌صورت جداگانه محاسبه شد و برای لایه‌های آلومینیم و مس به ترتیب 14% و 83% افزایش یافت. عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم/مس همانند نمونه‌های اولیه حاکم است، البته با این تفاوت که میکروحفرات برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم عمق‌تر و کوچک‌تر شده‌اند.

Investigation of mechanical properties, fractography and microstructure of layered Al/Cu composite produced by cold roll bonding

Davood Rahmatatabadi¹, Moslem Tayyebi², Ramin Hashemi^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2- Department of Material Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

Keywords

Layered Al/Cu composite
Cold roll bonding
Mechanical properties
Fractography and microstructure

Abstract

In recent years, layered composite have been attention of many researchers and different industries. Cold roll bonding is one of the method for produce layered composite that compared to other composite manufacturing methods are more economically and have the ability to produce layered composite with different material. In the present study, Al/Cu layered composite was produced through CRB method at room temperature, without lubricant and via using laboratory rolling machine by applying 60% reduction in thickness. Also mechanical properties, fracturgraphi and microstructure investigated through uniaxial tensile test, microharsness, scanning electron and optiv microscope. Results of carried out tests, showed the value of tensile strength and microhardness for Al/Cu layered composite compared to initial Al 5052 and pure Cu, increased that the main cause of this increase is applied high strain and cold working. Value of tensile strength for Al/Cu layered composite received 415 MPa that compared to initial Al 5052 and pure Cu 48% and 140% enhanced, respectively. Also microhardness calculated for each layers of composite individually and for Al and Cu increased 14% and 83% respectively. Results of SEM demonstrated that ductile fracture mechanism govern for Al/Cu composite such as initial samples, but the difference is that dimples for composite layers shallower and smaller compared to initial samples.

Please cite this article using:

Rahmatatabadi, D. Tayyebi, M. and Hashemi, R., "Investigation of mechanical properties, fracturgraphi and microstructure of layered Al/Cu composite produced by cold roll bonding", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 311-318, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [14]، درجه حرارت اتصال [15]، زمان آنیلینگ قبل و بعد از فرآیند [16، 17]، سرعت نورد [18] ضخامت اولیه [14-18]، جهت نورد [14] و حضور ذرات بین ورق [19] می‌باشد. همچنین نورد سرد پیوندی به منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، از قبیل آلومینیم [12]، فولاد [20]، مس [21]، کامپوزیت آلومینیم/مس [22]، آلومینیم/تیتانیوم [23]، آلومینیم/منیزیم [24].

در این تحقیق، برای اولین بار از آلیاژ آلومینیمی (5052) برای ساخت کامپوزیت آلومینیم/مس با استفاده از روش پیوند سرد نوردی استفاده شد و به دنبال آن بهترین خواص مکانیکی برای کامپوزیت تولید شده نسبت به پژوهش‌های پیشین حاصل شد. در کار حاضر، با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینوم 5052 و مس خالص در دمای محیط، بدون استفاده از روانکار و با استفاده از ماشین نورد آزمایشگاهی، تولید شد. همچنین خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره، میکروسختی و شکست‌نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی، خواص ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد تحقیق

ویژگی‌ها و ترکیب شیمیایی مواد استفاده شده در این تحقیق (آلومینیم 5052 و مس خالص با ضخامت 1 میلی‌متر) در جدول 1 ارائه شده است.

۲-۲- فرآیند پیوند سرد نوردی

به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریز ساختاری و سطح مقطع شکست ورق کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم/مس تولید شده به روش پیوند سردی، در ابتدا نمونه‌های اولیه (دو ورق آلومینیم 5052 و یک ورق از جنس مس خالص) در ابعاد یکسان 120 میلی‌متر طول، 50 میلی‌متر عرض و 1 میلی‌متر ضخامت بریده شد. شماتیک فرآیند پیوند سردی در شکل 1 نشان داده شده است. بر این اساس پس از آماده سازی، نمونه‌های اولیه با استفاده از حمام استون چربی زدایی شده و توسط برس فولادی خراشیده و زبر می‌شوند [25] و سپس سه ورق (ورق‌های آلومینیم لایه‌های خارجی و ورق مس لایه دورنی) روی هم قرار داده شد، البته به منظور جلوگیری از لغزش آن‌ها بر روی هم، نمونه‌ها را از چهار طرف سوراخ کرده و توسط سیم مسی بهم محکم بسته می‌شوند و سپس پیوند سردی با 60% کاهش ضخامت برقرار شد. توجه شود که به منظور جلوگیری از اکسیدشدن لایه‌های سطحی، زمان بین آماده‌سازی سطوح و عملیات نورد نباید بیشتر از 150 ثانیه باشد [25]. در مرحله آخر پیوند بین ورق‌های روی هم گذاشته شده به وسیله ماشین نورد آزمایشگاهی با قطر غلطک‌های 110 میلی‌متر، بدون استفاده از روانکار و در دمای اتاق برقرار شد.

۲-۳- بررسی خواص مکانیکی، ریزساختار و سطح مقطع شکست

در این تحقیق و پس از ساخت نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیم-مس، خواص مکانیکی به وسیله آزمون کشش تک‌محوره و میکروسختی، بررسی ریزساختار به وسیله میکروسکوپ نوری و بررسی سطح مقطع شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت که آماده‌سازی نمونه‌ها برای هر آزمون به اختصار توضیح داده می‌شود. برای نمونه‌های اولیه مس خالص، آلومینیم 5052 و نمونه کامپوزیتی تولید شده، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین وایرکات و مطابق با شماتیک شکل 2

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های زمینه فلزی و لایه‌ای به واسطه خواصی مانند استحکام بالا و وزن پایین نسبت به دیگر مواد فلزی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند [1]. این مواد دارای کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف می‌باشند [2]. آلومینیم با قیمت کم و دانسیته پایین در مقایسه با سایر آلیاژهای سبک مانند منیزیم و تیتانیوم بیشترین کاربرد و مصرف را در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارد و به واسطه‌ی خواص آلومینیم، می‌توان تلفیق مناسبی از استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت به خوردگی را در کامپوزیت‌های زمینه فلزی بدست آورد [3]. همچنین آلیاژهای لایه‌ای و کامپوزیتی آلومینیم بیشتر در صنایع اتومبیل‌سازی برای کاربردهای انتقال حرارت به دلیل داشتن چندین ویژگی جالب و به صورت همزمان مانند چگالی کم، خواص مکانیکی مطلوب، هدایت حرارتی خوب و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد [4]. هدایت الکتریکی بالا و مقاومت الکتریکی پایین مس سبب شده تا یکی از فلزات پرکاربرد در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و چندلایه بشمار آید. کامپوزیت آلومینیم-مس به سبب خواص مطلوب دو فلز مس و آلومینیم می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنایع از جمله هوافضا، خودرو، برق و الکتریک و متالورژی داشته باشد [5]. همچنین به جای قطعات خاص مسی در سیستم‌های انتقال قدرت در زمانی که وزن و هزینه مد نظر باشد بکار گرفته می‌شود بنابراین، پیوستن دو فلز غیر مشابه مس و آلومینیم می‌تواند موجب طراحی بهینه‌ای برای سیستم‌های انتقال قدرت شود [6]. از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلیاژهای چندلایه، روش پیوند سرد نوردی در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های کاربردی منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش‌های دیگر رشد و توسعه سریعی داشته است [4]. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن این روش و همچنین قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. فرآیند پیوند سرد نوردی توسط محققین با اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد [7]، پیوند به وسیله نورد سرد [8]، پوشش به وسیله نورد [9]، پیوند نورد سرد [10] معرفی شده است. پیوند سرد نوردی، نوعی جوشکاری حالت جامد می‌باشد، که پیوند آن بر اثر تغییرشکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات پیوند ایجاد می‌شود [11]. در این روش پیوند زمانی ایجاد می‌شود که انبساط سطحی در سطوح ورق‌ها ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار باید به اندازه کافی زیاد باشد به طوری که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود که این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [12]. این فرآیند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، که این مواد می‌توانند از یک جنس باشند و یا جنس‌های مختلفی را دارا باشند، علاوه بر این فلزاتی که به وسیله جوش سنتی نمی‌توان به هم جوش زد را می‌توان با این روش بهم اتصال داد [12]. در اوایل سال‌های ابداع این روش، آن‌را به عنوان یک روش امیدبخش برای تولید انبوه ورق و فویل قلمداد می‌کردند [13]. در سال‌های اخیر از فرآیند پیوند سرد پیوندی به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل لایه‌ای بزرگ استفاده می‌شود [12]. مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای حاکم باند به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال انجام شده است، و شرایط روند به خوبی تعریف شده است. گزارش شده است که پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از

¹ Cold Pressure Welding by Rolling

² Bonding by Cold Rolling

³ Clad Sheet by Rolling

⁴ Cold Roll Bonding

بر اساس استاندارد JIS Z2201 آماده شد.
جدول ۱ خواص اولیه آلیاژ آلومینیم و مس خالص

Table 1 Specifications of initial alloy Al and pure Copper

| ماده | ترکیب شیمیایی (%) | استحکام کششی (مگاپاسکال) | میکروسختی (ویکرز) |
|---------------|---|--------------------------|-------------------|
| آلومینیم 5052 | Al 96.6, Mg 2.2, Fe 0.4, Cr 0.2, Si 0.2, Mn 0.1, Zn 0.1, Cu 0.1, others 0.1 | 281 | 92 |
| مس خالص | - | 173 | 74 |

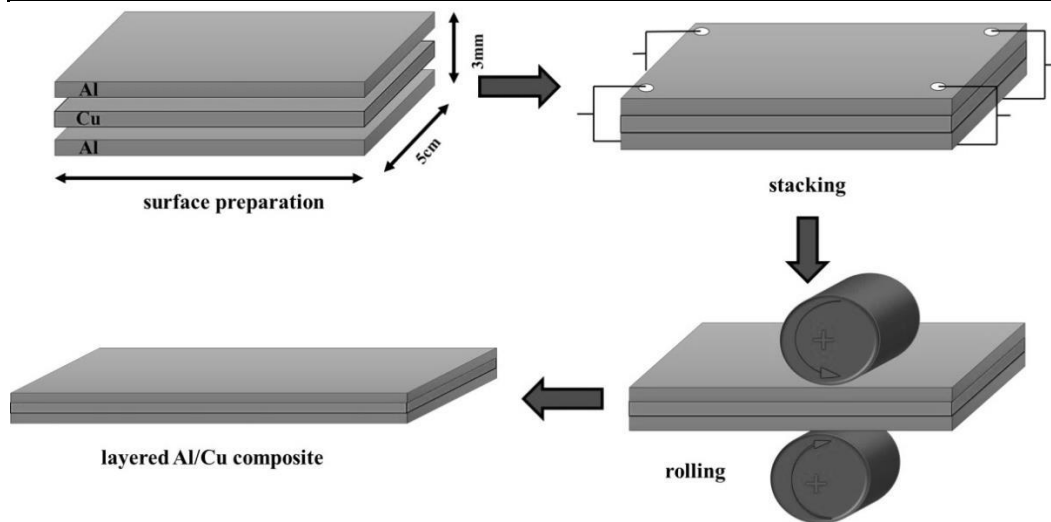


Fig. 1 Schematic illustration of CRB process

شکل ۱ شماتیک فرآیند جوش سرد نوردی

پس از مانع نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه گردان پولیش و با استفاده از سنباده‌های 800 تا 1200 برای میکروسختی و سنباده‌های 800 تا 3000 برای بررسی ریزساختار (عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ نوری) پرداخت شد. میکروسختی برای هر نمونه به صورت رندوم در بیش از 10 نقطه مختلف اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد.

سطح نمونه‌های شکست، پس از انجام تست کشش تک محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین مکانیزم شکست برای نمونه کامپوزیتی تولید شده و مقایسه با مواد اولیه، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، VEGA TESCAN مورد بررسی قرار گرفت.

آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ و با استفاده از دستگاه SANTAM S20 انجام شد. مقدار ازدیاد طول نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری طول گیج، قبل و بعد از تست کشش تعیین شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جنیوس تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) اندازه‌گیری شد. جهت بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری TUCSEN مجهز به نور قطبیده شده استفاده شد. قبل از انجام آزمون‌های میکروسختی و بررسی ریزساختار، جهت تسهیل در جابه‌جایی نمونه‌ها از مانع سرد استفاده شد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- خواص مکانیکی و ریزساختار

شکل 3 نمودار تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت Al/Cu فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی و نمونه‌های اولیه (آلومینیم آلیاژی 5052 و مس خالص) را نشان می‌دهد. همانطوری که مشاهده می‌شود، کامپوزیت فرآوری شده، استحکام کششی بیشتری نسبت به ورق‌های اولیه دارد و استحکام کششی آن به مقدار 414.5 مگاپاسکال می‌رسد که مطابق با جدول 2 نسبت به ورق‌های مس و آلومینیم به ترتیب 140% و 48% افزایش یافته است. البته مقدار ازدیاد طول برای نمونه‌ی کامپوزیتی تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه کاهش یافته است و با توجه به اعمال کرنش زیاد (کاهش ضخامت 60%) و انجام کار سرد (نورد در دمای اتاق) افزایش استحکام شش و کاهش ازدیاد طول، کاملاً منطقی و قابل پیش‌بینی می‌باشد.

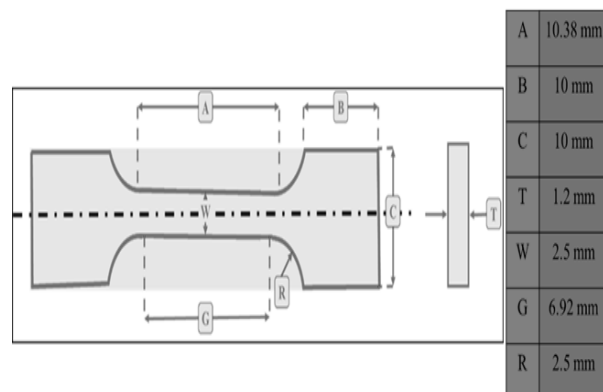


Fig. 2 Dimensions of tensile test specimens used according to Jis Z2201

شکل ۲ ابعاد نمونه‌های آزمون کشش استفاده شده براساس استاندارد Jis Z2201

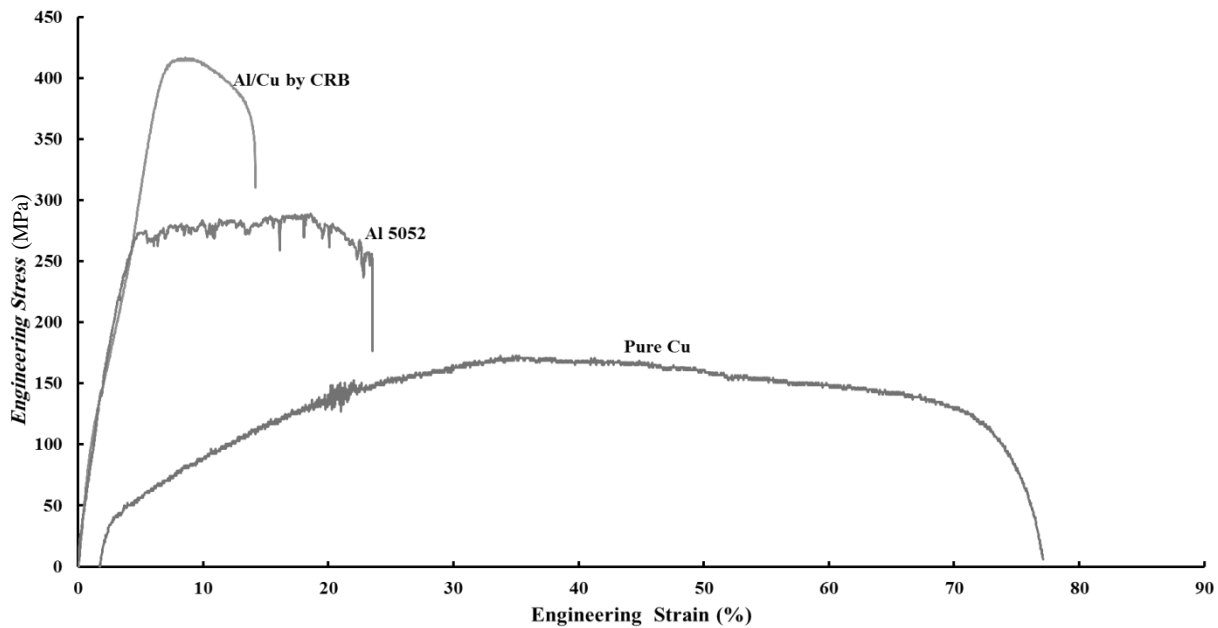


Fig. 3 Engineering stress-strain curves of initial sample and Al/Cu composite produced by CRB process

شکل ۳ نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق‌های اولیه و کامپوزیت لایه‌ای فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی

جدول ۲ تغییرات ضخامت لایه و خواص مکانیکی

Table 2 Variations of layer thickness and mechanical properties

| ماده | ضخامت لایه قبل از فرآیند پیوند سرد نوردی (μm) | ضخامت لایه بعد از فرآیند پیوند سرد نوردی (μm) | میکروسختی قبل از فرآیند پیوند سرد نوردی (ویکرز) | میکروسختی بعد از فرآیند پیوند سرد نوردی (ویکرز) | استحکام نهایی قبل از پیوند سرد نوردی (مگاپاسگال) | استحکام نهایی بعد از پیوند سرد نوردی (مگاپاسگال) |
|---------------|---|---|---|---|--|--|
| مس خالص | 1000 | 414±4 | 74±3 | 136±2 | - | 178 |
| آلومینیم 5052 | 1000 | 393±5 | 92±2 | 103±5 | - | 281 |
| آلومینیم/مس | 3000 | 1200 | - | - | 415 | - |

از علل افزایش میکروسختی می‌توان به کارسرد، اعمال کرنش زیاد و افزایش چگالی ناهنجاری اشاره کرد که در کارهای مشابه قبلی نیز ذکر شده اند و از عوامل موثر در افزایش سختی بوده‌اند [26,25].

با توجه به شکل 4 و جدول 2 که نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه سختی برای هر دو لایه آلومینیم و مس بعد از نورد و در کامپوزیت تولید شده نسبت به قبل از نورد افزایش یافته است، مشاهده می‌شود که سختی لایه‌ی مسی در کامپوزیت تولید شده نسبت به لایه‌ی آلومینیمی افزایش بیشتری داشته است به طوری که نرخ افزایش میکروسختی برای مس 82.5% و برای آلومینیم 12.1% می‌باشد. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی برای نمونه‌های آلومینیم و مس را می‌توان اختلاف در انرژی نقش در چینش دو ورق اولیه دانست.

در شکل 5، ریزساختار و ترتیب اتصال ورق‌های آلومینیم و مس در کامپوزیت لایه‌ی آلومینیم/مس تولید شده با روش پیوند سرد نوردی مشاهده می‌شود. در شکل 5، ریزساختار و ترتیب اتصال ورق‌های آلومینیم و مس در

همچنین تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز روند تغییرات در خواص مکانیکی بدست آمده را تایید می‌کند [26].

علاوه بر آزمون کشش تک‌محوره، مطابق با شکل 4 مقدار میکروسختی ویکرز برای نمونه‌های اولیه و لایه‌های آلومینیم و مس کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی و به صورت مجزا محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. افزایش میزان میکروسختی به دلیل اعمال کارسرد و افزایش کرنش سختی برای هر دو لایه‌ی آلومینیم و مس در کامپوزیت تولید شده قابل پیش‌بینی می‌باشد ولی به دلیل بدست آوردن مقدار میکروسختی، درصد افزایش و مقایسه دو لایه میکروسختی ویکرز انجام شده است. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نیز این امر را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که مقدار سختی برای هر دو لایه آلومینیم و مس در کامپوزیت تولید شده، نسبت به نمونه‌های اولیه خودشان به شدت افزایش می‌یابد و به ترتیب برای آلومینیم و مس، از مقادیر 74.3 و 92 به 136 و 103 می‌رسد.

گلوبی و اتصال آن‌ها به یکدیگر تا رسیدن به حد یک ترک ریز و رشد آرام ترک تا حد پارگی یا شکست نهایی است [27].

در شکل 7، سطح مقطع شکست نمونه‌ی کامپوزیتی و چندلایه‌ی آلومینیم/مس مشاهده می‌شود. همچنین در این، تصاویر برای هر دو لایه به صورت مجزا و با بزرگنمایی بیشتر نمایش داده شده است. در شکل 7 (لایه‌های آلومینیم و مس بعد از پیوند سرد نوردی)، واضح است که نسبت به شکل 6 (لایه‌های اولیه و قبل از فرآیند پیوند سرد نوردی)، دارای حفرات کمتر می‌باشد و همچنین عمق حفرات نیز کاهش یافته است که دلیل اصلی این قضیه، اعمال کار سرد، کرنش زیاد و نهایتاً افزایش چگالی ناهنجاری می‌باشد.

با توجه به نمودار تنش-کرنش که بیانگر کاهش شکل‌پذیری و افزایش استحکام می‌باشد می‌توان گفت که سطح مقطع شکست نیز تاییدکننده این نتایج بوده و نشان می‌دهد که با اعمال کار سرد، استحکام افزایش یافته و از شکل‌پذیری آن نسبت به نمونه‌ی اولیه کاسته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کامپوزیت لایه‌ای Al/Cu با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی ساخته شد و سپس خواص مکانیکی، میکروساختاری و سطح مقطع شکست با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوره، میکروسختی، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

1- کامپوزیت لایه‌ای آلومینیم-مس با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی با اعمال کاهش ضخامت 60% تولید شد. همچنین با توجه به تصویر میکروسکوپ نوری ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و پیوند مناسب بین لایه‌ها ایجاد شد.

2- خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده به مراتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده می‌باشد به طوری که مقادیر استحکام کششی و میکروسختی ویکرز افزایش می‌یابد و استحکام کششی 415 مگاپاسکال حاصل می‌شود و البته مقدار ازدیاد طول کاهش یافته است.

3- مقدار استحکام کششی برای کامپوزیت آلومینوم-مس تولید شده نسبت به مقادیر استحکام کششی برای نمونه‌های اولیه آلومینیم و مس به ترتیب 48% و 140% افزایش یافته است.

4- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که اعمال کرنش زیاد و کار سرد باعث کاهش تعداد و کم عمق شدن دیمل‌های موجود در لایه‌های کامپوزیت تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه شده است و این تغییرات حاکی از افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری می‌باشد که نتایج تحقیقات گذشته و نمودار تنش-کرنش نیز تایید کننده این موضوع می‌باشد.

5- مقدار سختی برای لایه‌های آلومینیم و مس بعد از فرآیند نسبت به قبل از فرآیند به ترتیب 12.1% و 82.5% افزایش یافته است که کار سرد و افزایش کرنش سختی دلایل اصلی این افزایش می‌باشد.

کامپوزیت لایه‌ی آلومینیم/مس تولید شده با روش پیوند سرد نوردی مشاهده می‌شود.

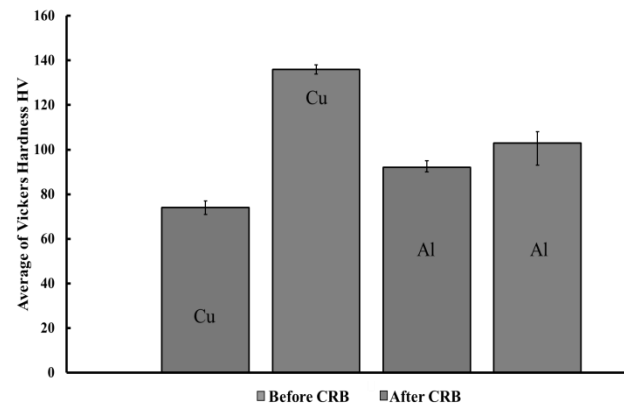


Fig. 4 Microhardness variations Al and Cu strips before and after CRB process

شکل ۴ تغییرات میکروسختی برای لایه‌های آلومینیم و مس قبل و بعد از فرآیند پیوند سرد نوردی

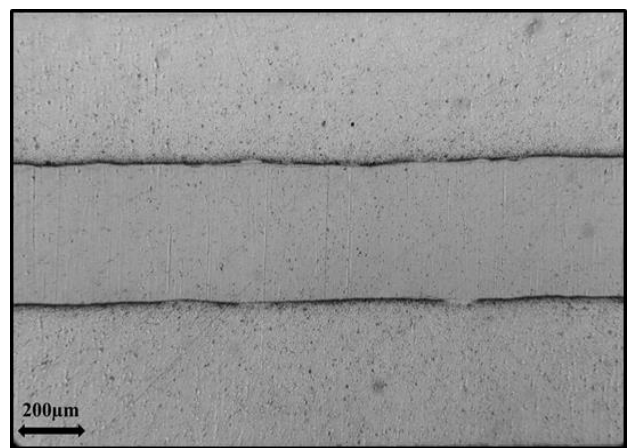


Fig. 5 Microstructure of Al/Cu composite produced by CRB process

شکل ۵ ریزساختار کامپوزیت Al/Cu فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی

شکل 5 و نتایج آزمون کشش تک‌محوره نشان می‌دهد که پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیم و مس به خوبی برقرار شده است. همچنین نتایج حاصل از تصویر میکروسکوپ نوری و بررسی خواص مکانیکی به صورت خلاصه در جدول 2 ارائه شده است که حاکی از بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ی تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه می‌باشد.

۳-۲- شکست‌نگاری

در شکل 6 سطح مقطع شکست ورق‌های آلومینیم و مس اولیه (قبل از فرآیند پیوند سرد نوردی) پس از آزمون کشش نشان داده شده است. مکانیزم غالب شکست فلزات دارای ساختار مکعبی وجوه مرکز پر ایجاد حفره و شکست نرم می‌باشد. از مشخصات شکست نرم تحت تاثیر تنش کششی، ظاهر گشتن گلوبی و ایجاد حفره‌های بسیار ریز (دیمل) در درون قسمت

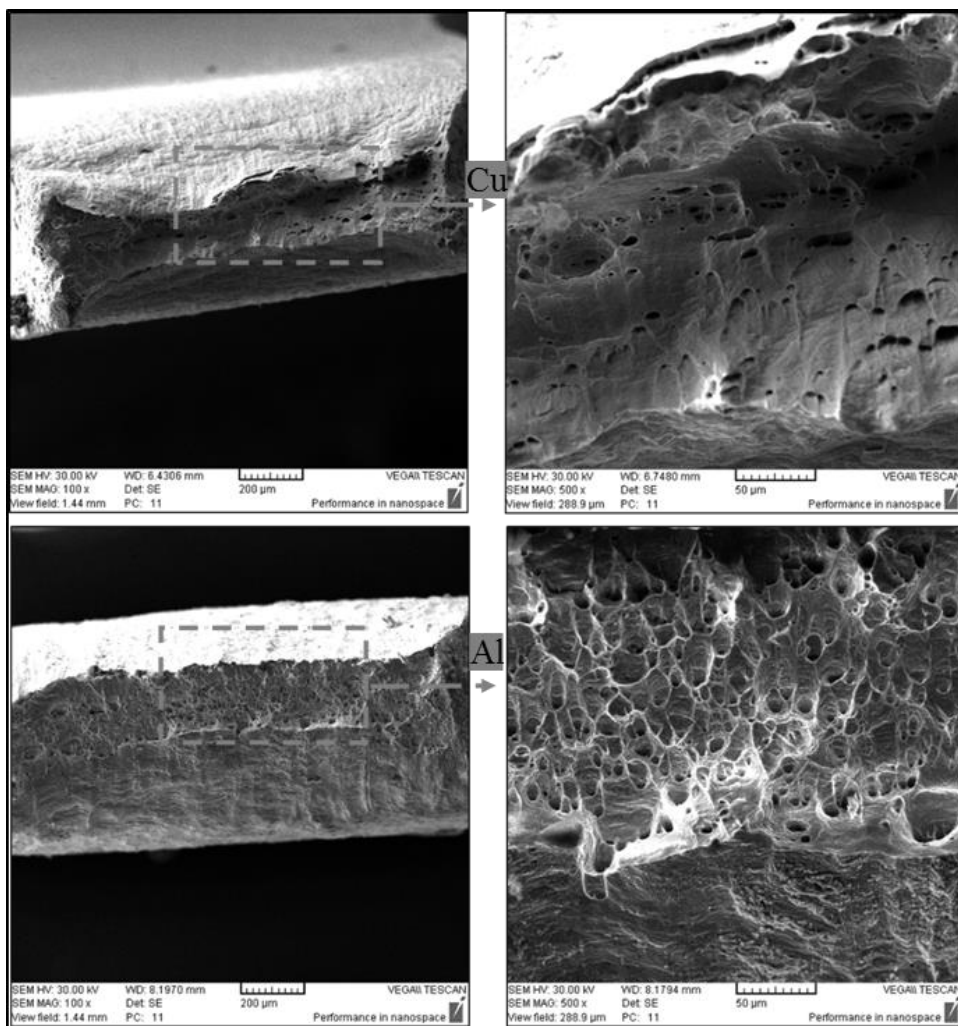


Fig. 6 Tensile fracture surfaces of initial sheets

شکل ۶ سطح مقطع شکست ورق‌های اولیه

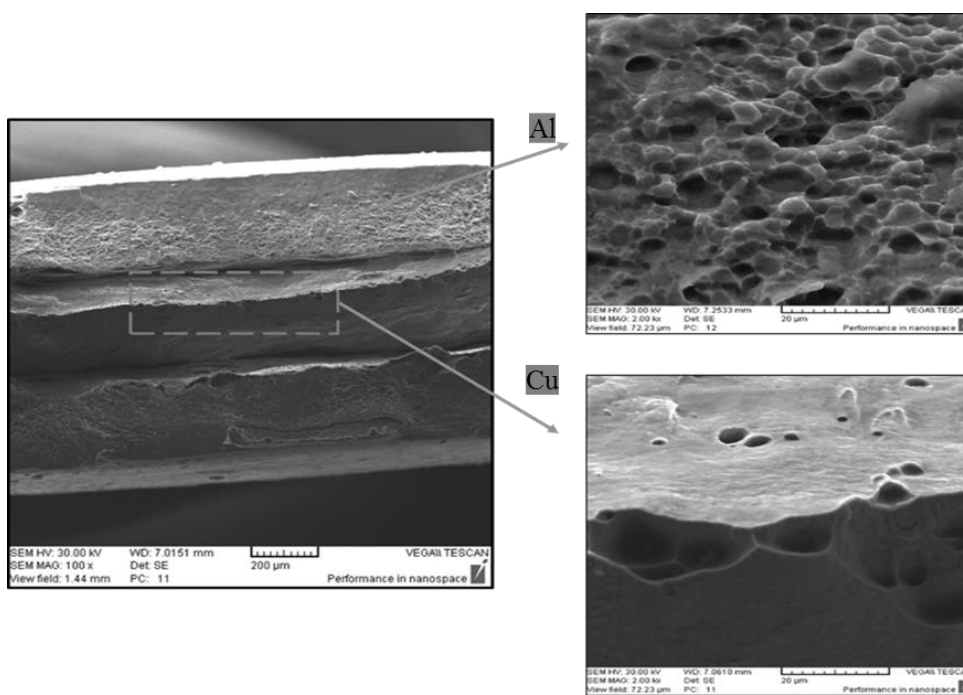


Fig. 7 Tensile fracture surfaces of Al/Cu composite produced by CRB process

شکل ۷ سطح مقطع شکست کامپوزیت Al/Cu فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی

۵- مراجع

- Accumulative Roll Bonding (ARB) Process", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2003-2009, 2008.
- [23] Yang, D. Cizek, P. Hodgson, P. Wen, C. E., "Ultrafine Equiaxed-Grain Ti/Al Composite Produced by Accumulative Roll Bonding", *Scripta materialia*, Vol. 62, No. 5, pp. 321-324, 2010.
- [24] Wu, K. Chang, H. Maawad, E. Gan, W. Brokmeier, H. Zheng, M., "Microstructure and Mechanical Properties of The Mg/Al Laminated Composite Fabricated By Accumulative Roll Bonding (Arb)", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 13, pp. 3073-3078, 2010.
- [25] Jamaati, R. Toroghinejad, M., "Cold Roll Bonding Bond Strengths: Review", *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
- [26] Rahmatabadi, D. Hashemi, R., "Experimental Investigation of Fracture Surfaces and Mechanical Properties of AA1050 Aluminum Produced by Accumulative Roll Bonding Process", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016. (in Persian)
- [27] Pineau, A. Benzerga, A. A. Pardoen, T., "Failure of Metals III. Fracture and Fatigue of Nanostructured Metallic Materials", *Acta Materialia*, 2015.
- [1] Jamaati, R. Toroghinejad, M. R. Najafzadeh, A., "An Alternative Method of Processing Mmcs by CAR Process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 10, pp. 2720-2724, 2010.
- [2] Lee, D. Kim, B., "Nanostructured Cu-Al₂O₃ Composite Produced By Thermochemical Process For Electrode Application", *Materials Letters*, Vol. 58, No. 3, pp. 378-383, 2004.
- [3] Estrada-Guel, I. Carreño-Gallardo, C. Mendoza-Ruiz, D. Miki-Yoshida, M. Rocha-Rangel, E. Martínez-Sánchez, R., "Graphite Nanoparticle Dispersion in 7075 Aluminum Alloy by Means of Mechanical Alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483, No. 1, pp. 173-177, 2009.
- [4] Li, L. Nagai, K. Yin, F., "Progress in Cold Roll Bonding of Metals", *Science and Technology of Advanced Materials*, 2016.
- [5] Lee, J. Bae, D. Chung, W. Kim, K. Lee, J. Cho, Y., "Effects of Annealing on The Mechanical and Interface Properties of Stainless Steel/Aluminum/Copper Clad-Metal Sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, pp. 546-549, 2007.
- [6] Ouyang, J. Yarrapareddy, E. Kovacevic, R., "Microstructural Evolution in The Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy (T6-Temper Condition) To Copper", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, pp. 110-122, 2006.
- [7] Milner, D. Vaidyanath, L., "Significance of Surface Preparation in Cold Pressure Welding", *MET CONSTR BR WELD J*, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.
- [8] Yong, J. Dashu, P. Dong, L. Luoxing, L., "Analysis of Clad Sheet Bonding by Cold Rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 32-37, 2000.
- [9] Yahiro, A. Masui, T. Yoshida, T. Doi, D., "Development Of Nonferrous Clad Plate And Sheet By Warm Rolling With Different Temperature Of Materials", *ISIJ international*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-654, 1991.
- [10] Madaah-Hosseini, H. Kokabi, A., "Cold Roll Bonding of 5754-Aluminum Strips", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002.
- [11] Danesh Manesh, H. Karimi Taheri, A., "Study of Mechanisms of Cold Roll Welding of Aluminium Alloy To Steel Strip", *Materials science and technology*, Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, 2004.
- [12] Jamaati, R. Toroghinejad, M. R., "Effect of Friction, Annealing Conditions and Hardness on The Bond Strength of Al/Al Strips Produced by Cold Roll Bonding Process", *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.
- [13] Karakazov, N., *Diffusion bonding of metals*, Pergamon Press Oxford, 1985.
- [14] Jamaati, R. Toroghinejad, M. R., "Investigation of The Parameters of The Cold Roll Bonding (CRB) Process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2320-2326, 2010.
- [15] Eizadjou, M. Manesh, H. D. Janghorban, K., "Investigation of Roll Bonding Between Aluminum Alloy Strips", *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008.
- [16] Manesh, H. D. Taheri, A. K., "The Effect of Annealing Treatment on Mechanical Properties of Aluminum Clad Steel Sheet", *Materials & design*, Vol. 24, No. 8, pp. 617-622, 2003.
- [17] Movahedi, M. Madaah-Hosseini, H. Kokabi, A., "The Influence of Roll Bonding Parameters on The Bond Strength of Al-3003/Zn Soldering Sheets", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 487, No. 1, pp. 417-423, 2008.
- [18] Abbasi, M. Toroghinejad, M. R., "Effects of Processing Parameters on The Bond Strength of Cu/Cu Roll-Bonded Strips", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 3, pp. 560-563, 2010.
- [19] Alizadeh, M. Paydar, M., "Study on The Effect of Presence of Tih 2 Particles on The Roll Bonding Behavior of Aluminum Alloy Strips", *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-86, 2009.
- [20] Tsuji, N. Saito, Y. Utsunomiya, H. Tanigawa, S., "Ultra-Fine Grained Bulk Steel Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process", *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 795-800, 3/5/, 1999.
- [21] Shaarbaaf, M. Toroghinejad, M. R., "Nano-Grained Copper Strip Produced by Accumulative Roll Bonding Process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1, pp. 28-33, 2008.
- [22] Eizadjou, M. Talachi, A. K. Manesh, H. D. Shahabi, H. S. Janghorban, K., "Investigation of Structure and Mechanical Properties of Multi-Layered Al/Cu Composite Produced by

