



مطالعه خواص مکانیکی و متالوژیکی کامپوزیت چند لایه Al/Cu تولید شده به روش فرایند اتصال پرس تجمعی

امیر مصطفی پور^{1*}، وحید محمدی نیا²، مصیب احمدی²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز کد پستی 516661671، a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 دی 1395

پذیرش: 25 دی 1395

ارائه در سایت: 10 بهمن 1395

کلید واژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید

اتصال پرس تجمعی

کامپوزیت شبکه فلزی

خواص مکانیکی

یکی از جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)، روش اتصال پرس تجمعی (APB) می‌باشد که در آن انباشت کرنش باعث تغییرات شدید پلاستیکی و میکروسکوپی می‌شود. در این پژوهش نیز روش APB برای تولید کامپوزیت Al/Cu، با استفاده از ورق آلیاژی AA100 و Cu خالص تجاری به ترتیب به عنوان فاز زمینه و فاز تقویت کننده مورد به کار برده شده است. ریزساختار نمونه‌های حاصل از فرایند با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین مطالعه تغییرات خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش و میکروسختی سنجی انجام شده است. نتایج مطالعات میکروساختاری نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند، توزیع فاز تقویت کننده (Cu) در داخل شبکه آلومینیوم بهبود یافته و منجر به شکست و تکه تکه شدن لایه‌های Cu در تمام طول نمونه شده است. همچنین استحکام نهایی، سختی و تغییرات طول کامپوزیت در این پژوهش با تکرار فرایند تا سه پاس افزایش یافته بطوریکه استحکام نهایی کامپوزیت در پاس سوم به 375 مگاپاسکال رسیده که نسبت به آلومینیوم اولیه 3.1 برابر و نسبت به Cu اولیه 2.7 برابر افزایش یافته است. سختی نیز در پاس سوم برای آلومینیوم به 62HV رسیده که نسبت به سختی ورق آلومینیوم اولیه 1.6 برابر افزایش پیدا کرده و برای Cu اولیه 152.6 HV می‌باشد که نسبت به سختی ورق Cu اولیه 2.6 برابر افزایش نشان می‌دهد. همچنین مطالعات شکست نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نوع شکست کامپوزیت از نوع شکست برشی نرم می‌باشد.

The investigation of mechanical and metallurgical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by Accumulative Press Bonding (APB) process

Amir Mostafapur^{*}, Vahid Mohammadinia, Mosayeb Ahmadi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 516661671, Tabriz, Iran, a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 December 2016
Accepted 14 January 2017
Available Online 29 January 2017

Keywords:

Sever Plastic Deformation (SPD)
Accumulative Press Bonding (APB)
Mechanical properties
Metallurgical properties
Composites

ABSTRACT

Accumulative press bonding (APB) process is one of the newest approaches of SPD processes in which the application of strain in materials leads to the substantial plastic deformation and microscopic changes. In this study, APB method was used for production of Al/Cu composite and AA100 and pure commercial Copper sheets used as matrix and reinforcement respectively. Microstructure evolutions followed by APB process were studied by Scan Electron Microscopy (SEM) and Optical Microscopy (OM). Mechanical characteristics were accomplished by conducting standard tensile and microhardness tests. The microscopic analysis indicates that as the number of APB passes increased, the reinforcement phase (Cu) dispersion improve and result in Cu continuous layers discrete in to shorter layers. Moreover, by increasing the number of APB passes up to 3 the ultimate strength, microhardness and elongation increased so that, the ultimate strength was raised to 375Mpa, which is about 3.1 and 2.7 times more than Al and Cu respectively. Under the 3 cycles of APB, the hardness of Al and Cu reached to 62 and 152.6 HV respectively, which are 1.6 and 2.6 times greater than those of corresponding pure materials. Furthermore, SEM observations demonstrated the failure mode in Al/Cu composite proceeded by APB process is shear ductile rupture.

1- مقدمه

امروزه فلزات و آلیاژهای متنوعی به عنوان فاز زمینه در تولید کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند ولی آلیاژهای سبک و استحکام بالا به دلیل افزایش بازده، موادی مناسب جهت تولید کامپوزیت‌های شبکه فلزی محسوب می‌شوند [3] البته مدول الاستیک کم برخی آلیاژهای سبک سبب می‌شود که حین بارگذاری دچار خمیدگی گردند و این از نظر طراحی چندان مناسب نمی‌باشد. یکی از راه‌های رفع این معضل، استفاده از تقویت کننده‌ها در ساخت

در سال‌های اخیر، مطالعه کامپوزیت‌های چندلایه فلزی به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی مناسب مورد توجه محققان علم مواد قرار گرفته‌اند؛ از همین رو کامپوزیت‌های چند لایه فلزی در صنایع گوناگون از جمله هوافضا، اتومبیل سازی، صنایع شیمیایی و الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [1,2].

Please cite this article using:

A. Mostafapur, V. Mohammadinia, M. Ahmadi, The investigation of mechanical and metallurgical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by Accumulative Press Bonding (APB) process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 109-114, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در حالت پنج لایه ابتدا آماده‌سازی سطوح انجام شده و سپس پارامترهای کنترلی فرایند برای انجام عمل پرس اعمال شد. در پاس اول حالت پنج لایه ابتدا سه ورق آلومینیومی به ضخامت 1.5 میلی‌متر و دو ورق Cu به ضخامت 0.5 میلی‌متر با استون تمیزکاری شدند و مجموع ضخامت ورق‌ها بعد از قرار گرفتن بر روی هم 4.5 میلی‌متر شد سپس سطوحی از ورق‌ها که می‌بایست بر روی هم قرار بگیرند برسکاری شدند. یکی از زیرکارها بر روی میز دستگاه پرس قرار گرفت سپس ورق‌های آماده شده بر روی آن گذاشته شده و زیرکار دوم بر روی ورق‌ها قرار گرفت در این مرحله عملیات پرسکاری با سرعت 1 میلی‌متر بر دقیقه تا رسیدن ضخامت ورق‌ها به 2.25 میلی‌متر (کرنش 50 درصد) انجام شد. لازم به ذکر است که فاصله زمانی بین برسکاری و عمل پرس برای جلوگیری از اکسید شدن دوباره نباید بیشتر از 60 ثانیه باشد [20]. شکل 1 شماتیکی از نحوه انجام فرایند APB در حالت پنج لایه را نشان می‌دهد. برای انجام پاس دوم حالت پنج لایه، کناره‌های زاید نمونه پنج لایه (پاس اول) را با قیچی بریده و سپس برای اطمینان از اتصال ورق‌ها و ادامه فرایند قطعه را از وسط برش دادیم و به صورت چشمی بررسی گردید. عملیات تمیزکاری و اکسیدزدایی مجدداً بر روی قطعات نصف شده انجام شد و بعد از آن عملیات پرسکاری انجام گرفت. این فرایند را تا سه پاس برای به دست آوردن قطعه 20 لایه تکرار شد. تکرار این فرایند باعث می‌شود که در هر پاس تغییر شکل نسبتاً بالایی به هر لایه اعمال گردد و تغییر شکل پلاستیک شدیدی را در کل ورق سبب شود [21].

برای مطالعه و بررسی ریزساختار نمونه‌های حاصل از فرایند از میکروسکوپ نوری اولمپیوس مدل PMG3-AN استفاده شده است. جهت آماده‌سازی سطح نمونه‌ها، ابتدا سطوح مورد نظر به ترتیب با سمباده‌های شماره 100 تا 1500 همراه با آب سمباده زده و سپس در آخر با خمیر الماسه پولیش نهایی انجام شد در نهایت قطعات پولیش شده با محلولی که شامل 5 گرم $FeCl_3$ ، 2 سی سی H_2L و 96 سی سی الکل می‌باشد، اچ شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. و همچنین جهت بررسی اتصال لایه‌ها در کامپوزیت Al/Cu از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. برای آماده‌سازی سطح نمونه‌ها برای عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی، ابتدا سطوح مورد نظر به ترتیب با سمباده‌های شماره 100 تا 1500 همراه با آب سمباده زده و سپس در آخر با خمیر الماسه پولیش نهایی انجام گرفته و سپس با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی عکس برداری از نمونه‌ها انجام شد.

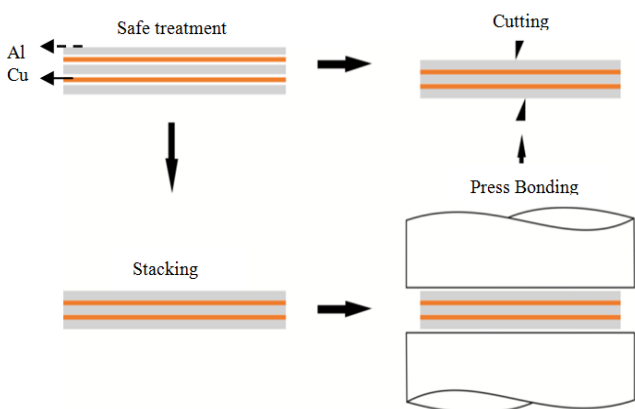


Fig. 1 Schematic illustration of APB process

شکل 1 شماتیک نحوه انجام فرایند APB

کامپوزیت‌های زمینه فلزی بخصوص نوع آلومینیومی برای رفع این معضل می‌باشد از طرف دیگر، هزینه بالا و پیچیدگی روش ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ویسکوزها، الیاف پیوسته و الیاف کوتاه همراه با جذابیت‌های ویژه‌ی این گروه از مواد مهندسی، سبب توجه محققان به تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای توسط فرایندهای پوشش‌دهی مانند جانشینی یونی تبخیر و اتصال نفوذی دو جنس مختلف شده است [4-6] همچنین تولید کامپوزیت‌های چند لایه فلزی بوسیله فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید نیز مورد توجه قرار گرفته است. بعنوان مثال کامپوزیت AL/CU تولید شده با استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، دارای خواص منحصر بفردی از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوردگی بسیار عالی آلومینیم و رسانایی الکتریکی و گرمایی فوق‌العاده Cu می‌باشد [7-9].

فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید شامل روش‌های بسیار متعددی نظیر [10, 11] ECAP, [12, 13] HPT, [14, 15] ARB می‌باشد ولی اکثر این روش‌ها نیازمند ابزار گران قیمت و مراحل پیچیده‌ای می‌باشند که استفاده صنعتی آن‌ها را با مشکل مواجه کرده است [16, 17]. روش APB یکی از جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد که قابلیت تولید مواد با ساختار فوق ریزدانه و حتی مواد نانو ساختار را دارا می‌باشد. علاوه بر آن یک روش مناسب برای اتصال فلزات همجنس و غیر همجنس در حالت سرد و گرم نیز محسوب می‌شود. از مزایای مهم دیگر این روش ساده بودن و عدم نیاز به تجهیزات گران قیمت و قالب‌های خاص برای انجام این فرایند نسبت به سایر روش‌های SPD می‌باشد؛ بنابراین روش APB به دلیل سادگی و اقتصادی بودن به عنوان رقیبی جدی برای سایر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید جهت تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای محسوب می‌شود [18, 19]. در این پژوهش از روش APB برای تولید کامپوزیت AL/CU استفاده شده است و هدف این پژوهش بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی کامپوزیت AL/CU تولید شده به روش APB در پاس‌های مختلف و همچنین ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی این کامپوزیت و در نهایت، بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده می‌باشد.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از آلومینیوم آلیاژی AA1100 و Cu خالص به صورت ورق جهت فرایند APB استفاده شده است. پارامترهای مؤثر در فرایند APB دما، سرعت دستگاه پرس و ضخامت ورق اولیه می‌باشند [18]، که در این پژوهش، فرایند در دمای محیط و سرعت دستگاه پرس 1 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده و همچنین فرایند APB بدون استفاده از روان‌کار در 3 پاس تولید شده است [19].

برای انجام فرایند ابتدا ورق آلومینیوم و Cu در ابعاد 25×50 میلی‌متر (ورق آلومینیومی به ضخامت 1.5 میلی‌متر و ورق Cu به ضخامت 0.5 میلی‌متر) بریده شدند سپس برای آنیل کردن نمونه‌ها از کوره حرارتی مافلی مدل شعله 1250 استفاده گردید. برای انجام آنیل نمونه‌ها ورق آلومینیومی به مدت 120 دقیقه در دمای 370 درجه سانتی‌گراد و ورق Cu به مدت 60 دقیقه در دمای 500 درجه سانتی‌گراد در داخل کوره الکتریکی قرار داده شدند و بطور کامل تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند [20]. بعد از عملیات آنیل، نمونه‌ها تمیزکاری شدند، بدین منظور، ورق‌های آلومینیومی و Cu ابتدا با استون شستشو داده شدند تا چربی و آلودگی موجود در سطوح قطعات از بین برود و سپس جهت اکسیدزدایی سطوحی که قرار است به هم پرس شوند از برس سیمی فولادی به قطر 0.4 میلی‌متر استفاده گردید. برای انجام فرایند

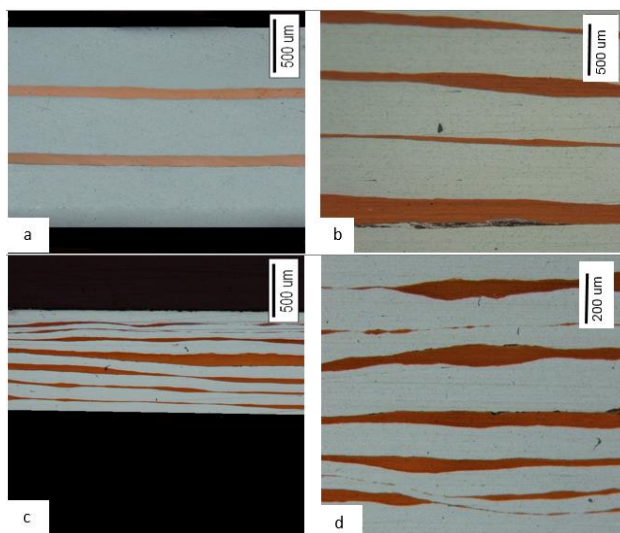


Fig. 2 Optical microscopy the samples of produced by APB process (a) 1th (b) 2th (c), (d) 3th pass

شکل 2 عکس‌های متالوگرافی از نمونه های APB شده (a) پاس اول، (b) پاس دوم، (c) و (d) پاس سوم

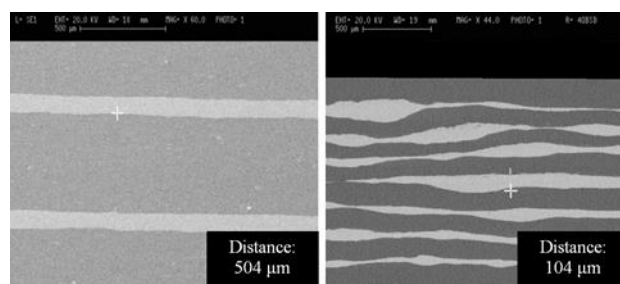


Fig. 3 SEM micrograph of APB processed Al-Cu composite in longitudinal cross-section 2st cycle

شکل 3 تصویر میکروسکوپ اسکن الکترونی از مقطع عرضی پاس سوم

همچنین مکانیزم تغییر فرم شدید برشی در زیر سطح به وسیله اصطکاک بین پرس و ورق تولید می‌شود که این ناحیه به شدت تغییر فرم یافته، می‌تواند حین سیکل‌های بعدی به داخل ضخامت ورق منتقل شود و باعث افزایش میزان کرنش اعمالی نهایی به ورق گردد بنابراین بعد از چند سیکل، کل ماده می‌تواند تحت تأثیر کرنش برشی شدید قرار گیرد [19,18].

3-2- بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها

شکل 4 نمودار تنش- کرنش مهندسی کامپوزیت حاصل از آزمون کشش کامپوزیت Al/Cu در پاس‌های یک تا سه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این آزمون نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB، استحکام نهایی افزایش یافته است و افزایش قابل توجه استحکام با افزایش تعداد پاس‌های APB مشاهده می‌شود. بیشترین استحکام (375 مگاپاسکال) بدست آمده مربوط به پاس سوم می‌باشد که نسبت به ورق آلومینیوم اولیه 3.1 برابر و نسبت به ورق Cu اولیه 2.7 برابر افزایش نشان می‌دهد. بر اساس تحقیقات انجام شده، تغییرات استحکام کامپوزیت بسیار تغییر شکل داده شده را نه تنها می‌توان به وسیله دو مکانیزم کرنش‌سختی و اصلاح دانه‌ها یا استحکام بخشی از طریق مرزدانه‌ها توجیح کرد بلکه نقش تقویت کنندگی لایه Cu در افزایش استحکام بسیار مؤثر می‌باشد [18,25,26].

در پاس‌های اولیه فرایند با اعمال کرنش، تغییر شکل پلاستیک فلز

برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده به روش APB، از تست کشش و آزمون میکرو سختی سنجی استفاده شده است. جهت انجام آزمون کشش، ابتدا نمونه‌های آزمون طبق استاندارد ASTM E8/E8M با دستگاه وایر کات بریده شدند و سپس با دستگاه تست کشش¹ و با سرعت 1mm/min تست‌ها انجام شدند [19]. آزمون میکرو سختی سنجی نیز با دستگاه میکرو هاردنس² و بر اساس استاندارد ASTM E384-11e1 انجام شد [20]. مقدار بار 50gr و مدت زمان اعمال بار 10 ثانیه انتخاب شده است. همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل استریو اسکن 440، برای مطالعه و تعیین نوع شکست نمونه های کامپوزیتی Al/Cu تولید شده به روش APB، استفاده شده است. آزمون شکست نگاری بر روی سطوح نمونه‌های شکسته شده پس از آزمون کشش، انجام شده است.

3- بحث و بررسی

3-1- مطالعات میکروساختاری

عکس‌های متالوگرافی از مقطع طولی نمونه‌های APB شده از پاس‌های مختلف فرایند در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB در اثر فشار، ضخامت لایه‌های Cu در پاس اول (شکل a-2) کاهش پیدا کرده و در پاس نهایی فرایند (شکل c,d-2) لایه‌های Cu به داخل شبکه آلومینیوم نفوذ کرده و پخش‌شدگی تکه‌های Cu در زمینه آلومینیوم بهبود یافته است. همچنین شکل 3 اتصال بین ورق آلومینیومی و Cu در پاس سوم را نشان می‌دهد که یک اتصال نفوذی بین ورق‌ها ایجاد شده و تغییرات ضخامت در لایه‌های آلومینیوم و Cu مشاهده می‌شود بطوریکه ضخامت لایه Cu از 500 میکرومتر به 122 میکرومتر کاهش پیدا کرده است که نسبت به پاس اول حدود 60% و نسبت به ورق Cu اولیه حدود 75% کاهش ضخامت در لایه Cu مشاهده می‌شود. همچنین شکل 3 نشان می‌دهد که بعد از پاس سوم فرایند APB، کامپوزیت با توزیع یکنواخت لایه‌های Cu در شبکه آلومینیوم با موفقیت تولید شده است.

عموماً حین تغییر شکل پلاستیک مواد غیر مشابه، به دلیل خواص مکانیکی فلز پایه (AA1100)، لایه‌های سخت‌تر (Cu) باریک‌تر شده و دچار شکست می‌شوند و تفاوت خواص مکانیکی لایه‌های غیرمشابه کامپوزیت Al/Cu منجر به تکه تکه شدن (شکستن) غیرهمگن لایه‌های Cu در شبکه آلومینیوم می‌شود [21-24]، مین³ و همکاران [24] نشان دادند که نوارهای برشی در اطراف فصل مشترک شبکه و فاز تقویت کننده به داخل فاز سخت حرکت کرده و به دلیل شکل‌پذیری کم فاز سخت، باعث برش و جدا شدن فاز سخت می‌شوند. در مراحل اولیه فرایند APB طول لایه‌های Cu بیشتر از فاصله باندهای برشی است در نتیجه این باعث تکه تکه شدن ناهمگن در زمینه آلومینیوم می‌شود. با ادامه پاس‌ها فرایند APB لایه‌های Cu به وسیله باندهای برشی کوتاه‌تر شده و در نهایت یک ساختار ماکرو در شبکه آلومینیوم که Cu به عنوان فاز تقویت کننده می‌باشد، تولید شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات ساختاری غیرهمگن مخصوصاً در فصل مشترک شبکه آلومینیوم و لایه‌های Cu ایجاد شده به دلیل تداخل غیرهمگن شبکه و لایه تقویت کننده می‌باشد که آن هم به دلیل اختلاف توزیع جریان تنش، اصطکاک بین شبکه آلومینیوم و لایه‌های Cu و اصطکاک بین زیرکارها (پلیت ها) و سطوح ورق‌ها می‌باشد.

¹ Model: Zwick/Roell- Z010

² Model: M-400G-GT-G3G3

³ Min

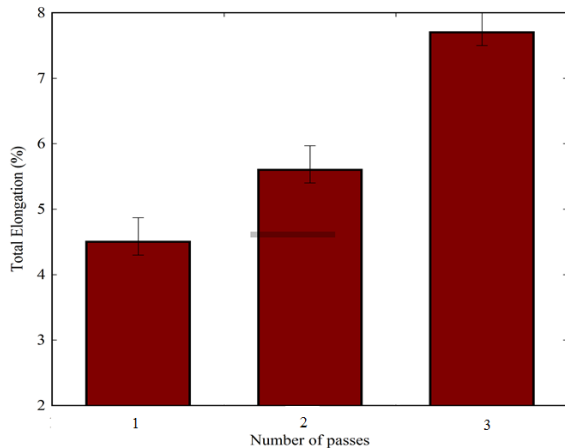


Fig. 5 Variation of elongation with number of APB passes

شکل 5 نمودار تغییرات طول کامپوزیت در پاس‌های مختلف فرایند APB

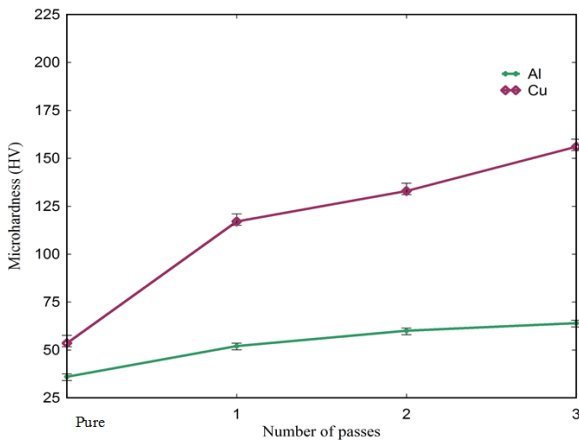


Fig. 6 Microhardness variation for individual Al and Cu layers for APB processed Al/Cu composite.

شکل 6 نمودار تغییرات سختی در پاس‌های مختلف فرایند APB

مقطع شکست نمونه کامپوزیتی Al/Cu در پاس سوم فرایند APB بعد از انجام تست کشش در شکل 7 به وضوح دیده می‌شود، همان طور که مشاهده می‌شود کیفیت اتصال لایه‌های آلومینیوم و Cu مطلوب می‌باشد بطوریکه فصل مشترک لایه‌ها در پاس سوم به سختی قابل تشخیص می‌باشد. با توجه به شکل، نوع شکست کامپوزیت Al/Cu از نوع شکست برشی نرم می‌باشد این نوع شکست با تشکیل و ترکیب حفره‌های بسیار ریز قبل از ترک و با محدودیت شدید فعالیت نابیجایی‌ها اتفاق می‌افتد [25,20] این نوع شکست در پژوهش‌های قبلی که تحت فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته بودند نیز مشاهده شده است [33,32,20].

4- نتیجه گیری

در این پژوهش کامپوزیت شبکه فلزی Al/Cu به روش APB در 3 پاس با موفقیت تولید شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:
- فرایند APB قادر به تولید کامپوزیت 5 لایه Al/Cu می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات میکروساختاری نشان داد که اتصال بین لایه‌های آلومینیوم و Cu با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB بهبود می‌یابد و با افزایش تعداد پاس‌ها لایه‌های Cu شروع به نازک شدن و شکست کرده و توزیع یکنواختی از لایه تقویت کننده (Cu) در شبکه آلومینیوم انجام می‌پذیرد.

بیشتر شده و نابجایی‌های زیادتری تولید می‌شود در نتیجه به دلیل افزایش میزان کرنش، نابجایی‌ها با یکدیگر و قفل شدن این نابجایی‌ها به همدیگر باعث استحکام بخشی به فلز می‌شوند [27,26]. با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و این باعث تولید ذرات ریز Cu در داخل شبکه آلومینیوم می‌شود و طبق رابطه هال-پیچ با کاهش اندازه دانه استحکام افزایش می‌یابد [28]. همچنین نقش تقویت کنندگی Cu در افزایش استحکام کامپوزیت بسیار مؤثر می‌باشد. با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB، توزیع یکنواختی از ذرات Cu در داخل شبکه آلومینیوم اتفاق می‌افتد و استحکام اتصال بین شبکه و فاز تقویت کننده افزایش می‌یابد و این پدیده منجر به افزایش استحکام کامپوزیت می‌شود [30, 29, 21].

تغییرات ازدیاد طول نمونه‌های APB شده در شکل 5 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های فرایند ازدیاد طول نمونه‌ها نیز افزایش پیدا کرده است و این افزایش ازدیاد طول را می‌توان به افزایش استحکام اتصال بین لایه‌های Al و Cu با افزایش تعداد پاس‌های فرایند مرتبط دانست چرا که با افزایش تعداد پاس‌ها کرنش افزایش یافته و به دنبال آن فشار لایه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به بهبود اتصال لایه‌ها می‌گردد. نتایج آزمون میکروسختی سنجی در نمودار شکل 6 نشان داده شده است همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های APB، سختی لایه‌های آلومینیوم و Cu روند افزایشی را نشان می‌دهد. مقدار میکروسختی اندازه‌گیری شده برای لایه‌های Al و Cu در پاس اول به ترتیب مقدار 52 VH و 118 می‌باشد، در پاس دوم مقدار میکروسختی به ترتیب برای Al و Cu، 59HV و 137HV افزایش پیدا کرده است و در پاس سوم سختی به بیشترین مقدار خود رسیده که برای آلومینیوم مقدار 62HV بوده که نسبت به سختی ورق آلومینیوم اولیه 1.6 برابر افزایش یافته و برای Cu مقدار 152.6HV می‌باشد که نسبت به سختی ورق Cu اولیه 2.6 برابر افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که میکروسختی شبکه آلومینیوم و لایه‌های اولیه Cu افزایش قابل ملاحظه‌ای طی فرایند APB داشته‌اند. در پاس‌های اولیه شیب افزایش، قابل ملاحظه می‌باشد به عبارت دیگر کارسختی برای لایه‌های Cu و شبکه آلومینیوم بسیار مؤثر می‌باشد. افزایش سریع سختی در مرحله اول فرایند، مربوط به کرنش سختی و افزایش نابجایی‌ها می‌باشد، با توجه به اینکه افزایش سیکل‌های APB باعث کاهش ضخامت لایه‌ها و در نتیجه باعث کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود و باعث افزایش سختی لایه‌ها می‌شود [32,31].

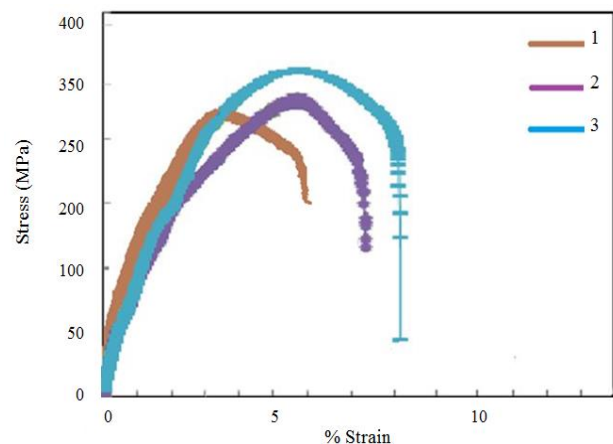


Fig. 4 The stress-strain curve of fabricated samples with different number of passes of the APB process

شکل 4 نمودار تنش-کرنش مهندسی در پاس‌های مختلف فرایند APB

- Engineering: A*, Vol. 304, 399-402, 2001.
- [9] M. Mahmoudi, A. Shokuhfar, S. Nakhodchi, A new severe plastic deformation technique based on simple and pure shear, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 145-154, 2016. (in Persian فارسی)
- [10] M. A. Ranaci, A. Afsari, S. Y. Ahmadi, Brooghani, M. M. Moshksar, Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-267, 2014. (in Persian فارسی)
- [11] M. Nili Ahmadabadi, H. Shirazi, H. Ghasemi-Nanasa, S. Hossein Nedjad, B. Poorganji, T. Furuvara, Role of severe plastic deformation on the formation of nanograins and nano-sized precipitates in Fe-Ni-Mn steel, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3526-31, 2011.
- [12] Y.u. Ivanisenko, R.Z. Valiev, H.J. Fecht, Grain boundary statistics in nanostructured iron produced by high pressure torsion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 390, pp. 159-65, 2005.
- [13] Z. Horita, D.J. Smith, M. Furukawa, M. Nemoto, R.Z. Valiev, T.G. Langdon, An investigation of grain boundaries in submicrometer-grained Al-Mg solid solution alloys using high-resolution electron microscopy, *Journal of Materials Research*, Vol. 11, No. 08, pp. 1880-1890, 1996.
- [14] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. G. Hong, Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- [15] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta Materialia*, Vol. 47, pp. 579-83, 1999.
- [16] G. Faraji, H.S. Kim, Review of principles and methods of severe plastic deformation for producing ultrafine-grained tubes, *Materials Science and Technology*, Vol. 4, pp. 1-9, 2016
- [17] H.Torabzadeh Ksishi, G. Faraji, A review of the production of ultrafine grained and nanograined metals by applying severe plastic deformation, *Modares Mechanical Engineering*, pp. 271-282, 2016.
- [18] S. Amirkhanlou, M. Ketabchi, N. Parvin, S. Khorsand, R. Bahrami, Accumulative press bonding; a novel manufacturing process of nanostructured metal matrix composites, *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 367-374, 2013.
- [19] A. Mostafapur, V. Mohammadinia, Mechanical properties and microstructure evolution of AA1100 aluminum sheet processed by Accumulative Press Bonding Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 1-6, 2016. (in Persian فارسی)
- [20] M. Eizadjou, H. Danesh Manesh, K. Janghorban, Mechanism of warm and cold roll bonding of aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 30, No.10, pp. 4156-4161, 2009.
- [21] M. Guanghui, J.M. Lee, S.B. Kang, H. W. Kim, Evolution of microstructure for multilayered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process, *Materials Letters*, Vol. 60, No. 27, pp. 3255-3259, 2006.
- [22] Ö. Yazar, T. Ediz, T. Öztürk, Control of macrostructure in deformation processing of metal/metal laminates, *Acta materialia*, Vol. 53, No. 2, pp. 375-381, 2005.
- [23] J.M. Lee, B. R. Lee, S. B. Kang, Control of layer continuity in metallic multilayers produced by deformation synthesis method, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 406, No. 1, pp. 95-101, 2005.
- [24] G. Min, J.M. Lee, S.B. Kang, H.W. Kim, Evolution of microstructure for multi-layered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process. *Materials Lettr*, Vol. 60, pp. 3255-3259, 2006.
- [25] R. N. Dehsorkhi, F. Qods, M. Tajally, Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn composite during accumulative roll bonding (ARB) process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 530, pp. 63-72, 2011.
- [26] A. Azimi, S. Tutunchilar, G. Faraji, M. K. Besharati Givi, Mechanical properties and microstructural evolution during multi-pass ECAR of Al 1100-O alloy, *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 388-394, 2012.
- [27] A. Azushima, R. Koop, D.Y. Yang, Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 2, pp 716-735, 2008.
- [28] H. Pirgazi, A. Akbarzadeh, R. Petrov, L. Kestens, Microstructure

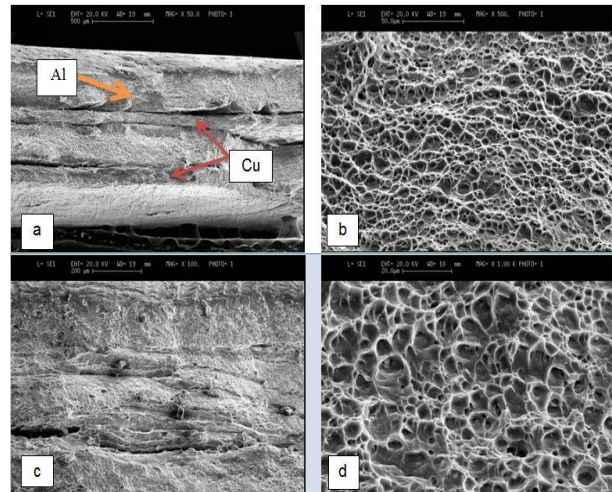


Fig. 7 Tensile fracture surfaces of Al/Cu composite in different passes of APB process: (a, b) 1th (c, d) 3th pass.

شکل 7 مقطع شکست نمونه کامپوزیتی Al/Cu در پاس‌های مختلف فرایند APB، (a پاس اول)، (c و d) پاس سوم

- با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB استحکام و سختی افزایش یافته است بطوریکه استحکام نهایی کامپوزیت در پاس سوم به 375 مگاپاسکال رسیده که نسبت به آلومینیم اولیه 3.1 برابر و نسبت به Cu اولیه 2.7 برابر افزایش یافته است. همچنین سختی در پاس سوم برای آلومینوم به بیش ترین مقدار خود (62HV) رسیده که نسبت به سختی ورق آلومینوم اولیه 1.6 برابر افزایش پیدا کرده و برای Cu اولیه 152.6 HV می‌باشد که نسبت به سختی ورق Cu اولیه 2.6 برابر افزایش نشان می‌دهد. و همچنین درصد ازدیاد طول نمونه‌ها نیز با افزایش تعداد پاس‌ها بهبود پیدا کرده است.

- مطالعات شکست نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نوع شکست کامپوزیت از نوع شکست برشی نرم می‌باشد.

5- مراجع

- [1] R.B. Mason, M.A. Miller, L.A. Gintert, M.F. Singleton, Corrosion testing and assessment of metal matrix composite components for military assets, *Tri-service corrosion conference*, Colorado, United States, pp. 1-14, 2007.
- [2] M. Dehghan, F. Qods, M. Gerdooei, Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of the ARB-processed of the purity Aluminium with interpassing heat treatment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 123-132, 2013. (in Persian فارسی)
- [3] F. Toptan, A. Kilicarslan, A. Karaaslan, M. Cigdem, I. Kerti, Processing and microstructural characterization of AA 1070 and AA 6063 matrix B4Cpreinforced composites, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 87-91, 2010.
- [4] C. Pande, K. Cooper, Nanomechanics of Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials, *Progress in Materials Science*, Vol. 54, pp. 689-706, 2009.
- [5] Y. Estrin, A. Vinogradov, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science, *Acta Materialia*, Vol. 61, pp. 782-817, 2013.
- [6] N. Mara, A. Sergueeva, A. Misra, A.K. Mukherjee, Structure and high-temperature mechanical behavior relationship in nano-scaled multilayered materials, *Scripta Materialia*, Vol. 50, No. 6, pp. 803-806, 2004.
- [7] F. Ebrahimi, D. Kong, Effect of microstructure on strength and fracture of electrodeposited Cu/Ni layered nano-composites, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 5, 609-616, 1999.
- [8] P.H. Shingu, K.N. Ishihara, A. Otsuki, I. Daigo, Nano-scaled multi-layered bulk materials manufactured by repeated pressing and rolling in the Cu-Fe system, *Materials Science and*

- deformation in a nanostructured metal, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 1699-709, 2004.
- [32] J. Gubicza, N. Q. Chinh, T. Csanadi, T. G. Longdon, T. Ungar, Microstructure and strength of severely deformed fcc metals, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 462, No.1, pp. 86-90, 2007
- [33] M. R. Toroghinejad, R. Jamaati, J. Dutkiewicz, J. A. Szpunar, Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process, *Materials & Design*, Vol. 51, 274-279, 2013.
- evolution and mechanical properties of AA1100 aluminum sheet processed by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 497, No. 1-2, pp. 132-138, 2008.
- [29] M. R. Toroghinejad, R. Jamaati, J. Dutkiewicz, J. A. Szpunar, Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process, *Materials & Design*, Vol. 51, 274-279, 2013
- [30] W. Wang, R.N. Singh, Influence of the microstructure on the mechanical properties of Ni:Sn multi-layered composites, *Material Science Engineering A*, Vol. 271, pp. 306-14, 1999.
- [31] Y.M. Wang, E. Ma, Three strategies to achieve uniform tensile