



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

امیر مصطفی پور<sup>۱\*</sup>، وحید محمدی نیا<sup>۲</sup>، مصیب احمدی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

\* تبریز کد پستی ۵۱۶۶۶۱۶۷۱ a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۱۱ دی ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۵ دی ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵

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 انباست کرنش باعث تغییرات شدید پلاستیکی و میکروسکوپی می‌شود. در این پژوهش نیز روش APB برای تولید کامپوزیت Al/Cu، با استفاده از ورق آلیاژی AA1100 و Cu خالص تجاری به ترتیب به عنوان فاز زمینه و فاز تقویت کننده مورد به کار برد شده است. ریزاختارت تمنه‌های حاصل از فرایند با میکروسکوپ نوری و الکترونی رویشی 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 آلومینیم 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 ۳۷۵ مگاپاسکال رسیده که نسبت به آلومینیم اولیه ۳.1 برابر و نسبت به Cu ۲.7 برابر افزایش یافته است. سختی نیز در پاس سوم برای آلومینیوم به 62HV رسیده که نسبت به سختی ورق آلومینیوم اولیه ۱.6 برابر افزایش پیدا کرده و برای Cu اولیه ۱۵۲.۶ HV می‌باشد که نسبت به سختی ورق Cu اولیه ۲.6 برابر افزایش نشان می‌دهد. همچنین مطالعات شکست نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رویشی 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 Mostafapor<sup>\*</sup>, 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 AA1100 and pure commercial Copper sheets used as matrix and reinforcement respectively. Microstructure evolutions samples 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.

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 گردد و این از نظر طراحی چندان مناسب نمی‌باشد. یکی از راههای رفع این معطل، استفاده از تقویت‌کننده‌ها 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 هواپیما، اتومبیل سازی، صنایع شیمیایی و الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [2,1].

### Please cite this article using:

A. Mostafapor, 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 می‌باشد 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 میلی‌متر) 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<sub>3</sub>, 2 سی سی H<sub>3</sub>L و 96 سی سی الکل می‌باشد، اج 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.

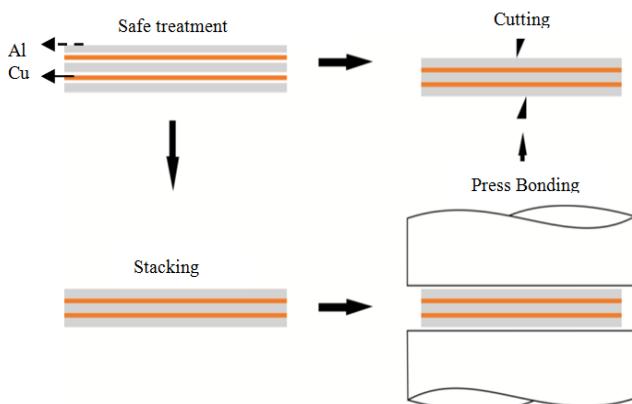


Fig. 1 Schematic illustration of APB process

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 ویسکرزا، الیاف پیوسته و الیاف کوتاه همراه با جذابیت‌های ویژه‌ای 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 [6-4]. 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 به فردی از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوردگی بسیار عالی آلومینیوم و رسانایی الکتریکی و گرمایی فوق العاده Cu می‌باشد [9-7].

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید شامل روش‌های بسیار متعددی نظیر [14,15], ARB [12,13], ECAP [10, 11] HPT [12,13] است. این روش‌ها نیازمند ابزار گران قیمت و مراحل پیچیده‌ای می‌باشند که استفاده صنعتی آنها را با مشکل مواجه کرده است [17,16]. روش APB یکی از جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد که قابلیت تولید مواد با ساختار فوق ریزدانه و حتی مواد نانوساختار را دارد می‌باشد. علاوه بر آن یک روش مناسب برای اتصال فلزات همجننس و غیر همجننس 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 [19,18]. در این پژوهش از روش APB برای تولید کامپوزیت AL/CU استفاده شده است و هدف این پژوهش بررسی خواص مکانیکی و متالوژیکی کامپوزیت AL/CU تولید شده به روش APB در پاس‌های مختلف و همچنین ارتباط بین ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی این کامپوریت 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 می‌باشد [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 رونکار در 3 پاس تولید شده است [19].

برای انجام فرایند ابتدا ورق آلومینیوم و Cu در ابعاد 50×25 میلی‌متر (ورق آلومینیومی به ضخامت 1.5 میلی‌متر و ورق Cu به ضخامت 0.5 میلی‌متر) بریده شدند سپس برای آنلیل کردن نمونه‌ها از کوره حرارتی مافلی مدل شعله 1250 استفاده گردید. برای انجام آنلیل 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 گرفتند [20]. بعد از عملیات آنلیل، 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

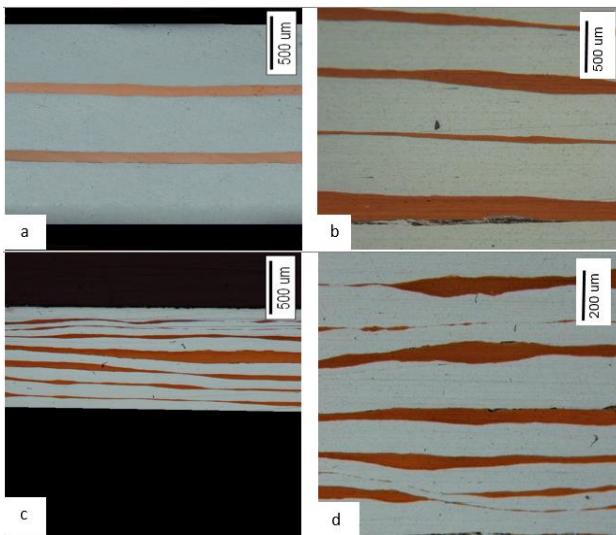


Fig. 2 Optical microscopy the samples of produced by APB process (a) 1th (b) 2th (c), (d) 3th pass

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

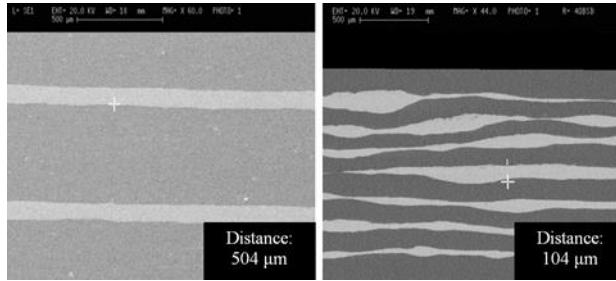


Fig. 3 SEM micrograph of APB processed Al-Cu composite in longitudinal cross-section 2st cycle

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 نهائی به ورق گردد بنابرین بعد از چند سیکل، کل ماده می‌تواند تحت تأثیر کرنش برشی شدید قرار گیرد [19,18].

### 3- بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها

شکل 4 نمودار تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت حاصل از آزمون کشش کامپوزیت Cu/Al 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 آلومنیوم 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 کرنش سختی و اصلاح دانه‌ها یا استحکام بخشی از طریق مرزدانه‌ها توجیح کرد بلکه نقش تقویت کننده‌گی لایه Cu در افزایش استحکام بسیار مؤثر می‌باشد [26,25,18].

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 واپر کات بروید شدند و سپس با دستگاه تست کشش<sup>1</sup> و با سرعت 1mm/min تست‌ها انجام شدند [19]. آزمون میکرو سختی سنجی نیز با دستگاه میکرو هاردنس<sup>2</sup> 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 رویشی مدل استریو اسکن 440، برای مطالعه و تعیین نوع شکست نمونه‌های کامپوزیتی Cu/Al 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

#### 1-3- مطالعات میکروساختاری

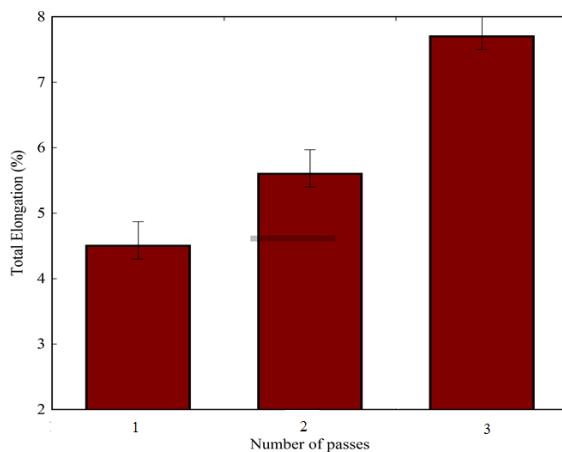
عکس‌های متالوگرافی از مقطع طولی نمونه‌های APB شده از پاس‌های مختلف فرایند در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهد می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB در اثر فشار، ضخامت لایه‌های Cu در پاس اول (شکل 2(a-2)) کاهش پیدا کرده و در پاس نهائی فرایند (شکل 2(c,d)) لایه‌های Cu به داخل شبکه آلومنیوم نفوذ کرده و پخش‌شدن تکه‌های Cu در زمینه آلومنیوم بهبود یافته است. همچنین شکل 3 اتصال بین ورق آلومنیومی و Cu در پاس سوم را نشان می‌دهد که یک اتصال نفوذی بین ورق‌ها ایجاد شده و تغییرات ضخامت در لایه‌های آلومنیوم 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% نسبت به ورق 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 آلومنیوم 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 شدن (شکستن) غیرهمگن لایه‌های Cu در شبکه آلومنیوم می‌شود [24-21]، مین<sup>3</sup> 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 شکل پذیری 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 شدن ناهمگن در زمینه آلومنیوم می‌شود. با ادامه پاس‌های APB لایه‌های Cu به وسیله باندهای برشی کوتاه‌تر شده و در نهایت یک ساختار ماکرو در شبکه آلومنیوم که Cu به عنوان فاز تقویت کننده به باشد، تولید شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات ساختاری غیرهمگن مخصوصاً در فصل مشترک شبکه آلومنیوم 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 آلومنیوم و لایه‌های Cu و اصطکاک بین زیرکارها (پلیت‌ها) و سطوح ورق‌ها می‌باشد.

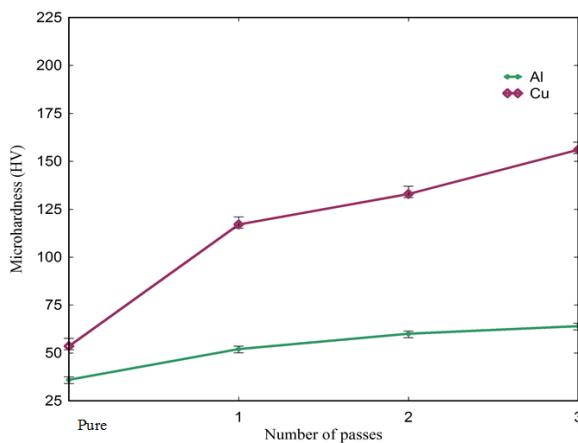
<sup>1</sup> Model: Zwick/Roell-Z010

<sup>2</sup> Model: M-400G-GT-G3G3

<sup>3</sup> Min



شکل ۵ نمودار تغییرات طول کامپوزیت در پاس‌های مختلف فرایند APB



شکل ۶ Microhardness variation for individual Al and Cu layers for APB processed Al/Cu composite.

شکل ۶ نمودار تغییرات سختی در پاس‌های مختلف فرایند APB

قطع شکست نمونه کامپوزیتی Al/Cu در پاس سوم فرایند APB بعد از انجام تست کشش در شکل ۷ 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 نابجایی‌ها 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].

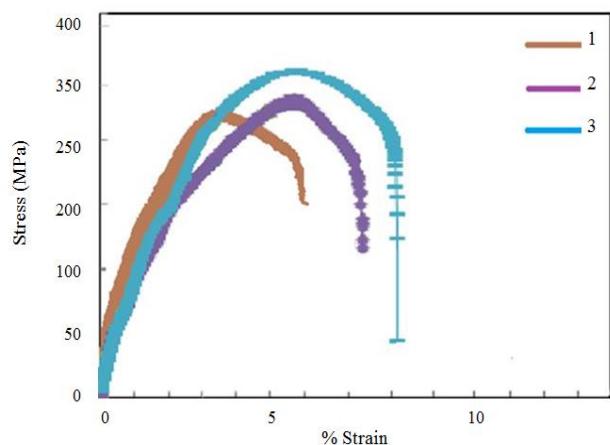
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت شبکه فلزی Al/Cu به روش APB در ۳ پاس با موفقیت تولید شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- فرایند APB قادر به تولید کامپوزیت ۵ لایه Al/Cu می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات میکروساختاری نشان داد که اتصال بین لایه‌های آلومینیوم و Cu با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB به نازک شدن و شکست کرده و توزیع یکنواختی از لایه تقویت کننده (Cu) در شبکه آلومینیوم انجام می‌پذیرد.

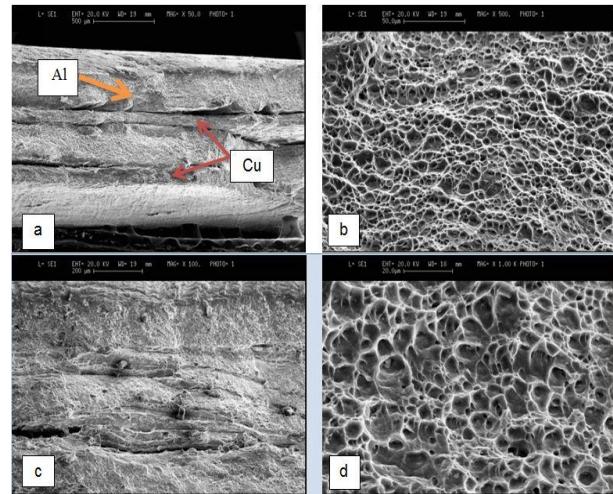
بیشتر شده و نابجایی‌های زیادتری تولید می‌شود در نتیجه به دلیل افزایش میزان کرنش، نابجایی‌ها با یکدیگر و قفل شدن این نابجایی‌ها به همدیگر باعث استحکام بخشی به فلز می‌شوند [27,26]. با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و این باعث تولید ذرات ریز Cu در داخل شبکه آلومینیوم می‌شود و طبق 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 ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ازدیاد طول را می‌توان به افزایش استحکام اتصال بین لایه‌های Al و Cu با افزایش تعداد پاس‌های فرایند مرتبه 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 میکروساختی سنجی در نمودار شکل ۶ 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 میکروساختی VH 52 اندازه‌گیری شده برای لایه‌های Al و Cu در پاس اول به ترتیب مقدار 118 و 59HV می‌باشد، در پاس دوم مقدار میکروساختی به ترتیب برای Al و Cu 137HV و 59HV 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 ۱.۶ برابر افزایش یافته و برای Cu اولیه ۲.۶ برابر افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که میکروساختی شبکه آلومینیوم و لایه‌های اولیه Cu افزایش قابل ملاحظه‌ای طی فرایند APB داشته‌اند. در پاس‌های اولیه شبکه 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].



شکل ۴ نمودار تنش-کریش 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)
- [10] M. A. Ranaei, A. Afsari, S. Y. Ahmadi, Brooghani, M. M. Moshksar, Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially purecopper deformed severely by equal channel angular pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257–267, 2014. (in Persian)
- [11] M. Nili Ahmadabadi, H. Shirazi, H. Ghasemi-Nanesa, S. Hossein Nedjad, B. Poorganji, T. Furuhara, 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, HS. 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 Ksshi, G. Faraji, A review of the production of ultrafine grained and nanogranulated metals by applying severe plastic deformation, *Modares Mechanical Engineering*, pp. 271–282, 2016.
- [18] S. Amirkhanlou, M. Katabchi, 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)
- [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 Lett*, 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. Tutuncilar, 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. Pirczazi, A. Akbarzadeh, R. Petrov, L. Kestens, Microstructure



**Fig. 7** مقطع شکست نمونه کامپوزیتی Al/Cu در پاس‌های مختلف فرایند APB process: (a, b) 1th (c, d) 3th pass.

**شکل 7** مقطع شکست نمونه کامپوزیتی Al/Cu در پاس‌های مختلف فرایند APB process: (a) پاس اول، (b) 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 اولیه Cu 2.7 برابر افزایش یافته است. همچنین سختی در پاس سوم برای آلومینیوم به بیش ترین مقدار خود (62HV) رسیده که نسبت به سختی ورق آلومینیوم اولیه 1.6 برابر افزایش پیدا کرده و برای Cu اولیه HV 152.6 می‌باشد که نسبت به سختی ورق Cu اولیه 2.6 برابر افزایش نشان می‌دهد. و همچنین درصد از دید طول نمونه‌ها نیز با افزایش تعداد پاس‌ها بهبود پیدا کرده است.

- مطالعات شکست نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روشنی نشان داد که نوع شکست کامپوزیت از نوع شکست برخی 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)
- [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 severly 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