ماهنامه علمى پژوهشى



-



mme.modares.ac.ir

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

 2 امير مصطفى پور * ، وحيد محمدى نيا²، مصيب احمدى

1– دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

a-mostafapur@tabrizu.ac.ir ،516661671 * تبريز كد پستى

چکیدہ	اطلاعات مقاله
یکی از جدیدترین روش های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)، روش اتصال پرس تجمعی (APB) میباشد که در آن انباشت کرنش باء تغییرات شدید پلاستیکی و میکروسکوپی میشود. در این پژوهش نیز روش APB برای تولید کامپوزیت Al/Cu، با استفاده از ورق آلیاژ AA1100 و Cu خالص تجاری به ترتیب به عنوان فاز زمینه و فاز تقویت کننده مورد به کار برده شده است. ریزساختار نمونههای حاصل	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 11 دی 1395 پذیرش: 25 دی 1395 ارائه در سایت: 10 بهمن 1395
فرایند با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین مطالعه تغییرات خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش میکروسختی سنجی انجام شده است. نتایج مطالعات میکروساختاری نشان میدهد که با افزایش تعدا پاس های فرایند، توزیع فاز کننده (Cu) در داخل شبکه آلومینیم بهبود یافته و منجر به شکست و تکه تکه شدن لایههای Cu در تمام طول نمونه شده است. همچن استحکام نهایی، سختی و تغییرات طول کامپوزیت در این پژوهش با تکرار فرایند تا سه پاس افزایش یافته بطوریکه استحکام نهای کامپوزیت پاس سوم به 375 مگاپاسکال رسیده که نسبت به آلومینیم اولیه 3.1 برابر و نسبت به Cu والیه 2.7 برابر افزایش یافته است. سختی نیز پاس سوم به 375 مگاپاسکال رسیده که نسبت به آلومینیم اولیه 3.1 برابر و نسبت به 20 برابر افزایش یافته است. سختی نیز پاس سوم برای آلومینیوم به 62HV رسیده که نسبت به سختی ورق آلومینیوم اولیه 3.1 برابر افزایش پیدا کرده و برای Cu والیه 5.2 پاس سوم برای آلومینیوم به 62HV رسیده که نسبت به سختی ورق آلومینیوم اولیه 3.1 برابر افزایش پیدا کرده و برای Cu والیه 5.2	<i>کلید واژگان:</i> تغییر شکل پلاستیک شدید اتصال پرس تجمعی کامپوزیت شبکه فلزی خواص مکانیکی

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

Amir Mostafapor^{*}, 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

ABSTRACT

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 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.

1- مقدمه

امروزه فلزات و آلیاژهای متنوعی به عنوان فاز زمینه در تولید کامپوزیتها استفاده می شوند ولی آلیاژهای سبک و استحکام بالا به دلیل افزایش بازده، موادی مناسب جهت تولید کامپوزیتهای شبکه فلزی محسوب می شوند [3] البته مدول الاستیک کم برخی آلیاژهای سبک سبب می شود که حین بارگذاری دچار خمیدگی گردند و این از نظر طراحی چندان مناسب نمی باشد. 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 [2,1].

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-15]

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 ویسکرزها، الیاف پیوسته و الیاف کوتاه همراه با جذابیتهای ویژهی این گروه از مواد مهندسی، سبب توجه محققان به تولید کامپوزیتهای لایهای توسط فرایندهای پوشش دهی 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

فرايندهاى تغييرشكل پلاستيك شديد شامل روشهاى بسيار متعددى نظير [11, ARB[14,15], HPT[12,13],ECAP[10, 11] مىباشد ولى اكثر اين 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 روش های تغییر شکل پلاستیک شدید می باشد که قابلیت تولید مواد با ساختار فوق ریزدانه و حتی مواد نانوساختار را دارا میباشد. علاوه بر آن یک روش مناسب برای اتصال فلزات همجنس و غیر همجنس در حالت سرد و گرم نیز محسوب می شود. 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 می باشد؛ 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 متالورژیکی 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 مكانيكي كامپوزيت توليد شده ميباشد.

2- مواد و روش تحقيق

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 روان کار 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 سانتی گراد و ورق Cu به مدت 60 دقیقه در دمای 500 درجه سانتی گراد 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

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 یرس قرار گرفت سیس ورق،های آماده شده بر روی آن گذاشته شده و زیر کار دوم بر روی ورق ها قرار گرفت در این مرحله عملیات پرسکاری با سرعت 1 ميلىمتر بر دقيقه تا رسيدن ضخامت ورقها به 2.25 ميلىمتر (كرنش 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 ورق ها و ادامه فرایند قطعه را از وسط برش دادیم و به صورت چشمی بررسی گردید. عملیات تمیزکاری و اکسیدزدایی مجددا 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 می شود 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 1000 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 FeCl₃ 2 سی سی L₃H و 96 سی سی الکل میباشد، اچ شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. و همچنین جهت استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. و همچنین جهت استفاده شده است. برای آمادهسازی سطح نمونهها برای عکسبرداری با استفاده شده است. برای آمادهسازی سطح نمونهها برای عکسبرداری با یمیکروسکوپ الکترونی، ابتدا سطوح مورد نظر به ترتیب با سمبادههای شماره المی این ایماه گرفته و سپس در آخر با خمیر الماسه پولیش نهایی انجام گرفته و سپس با استفاده از دستگاه میکروسکوپ



Fig. 1 Schematic illustration of APB process شکل 1 شماتیک نحوه انجام فرایند APB

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-15

Fig. 2 Optical microscopy the samples of produced by APB process (a) 1th (b2th (c), (d) 3th pass

شکل 2 عکسهای متالوگرافی از نمونه های APB شده a) پاس اول، b) پاس دوم، c (b) 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 می شود که این ناحیه به شدت تغییر فرم یافته، می تواند حین سیکل های بعدی به داخل ضخامت ورق منتقل شود و باعث افزایش میزان کرنش اعمالی نهائی به ورق گردد بنابرین بعد از چند سیکل، کل ماده می تواند تحت تأثیر کرنش برشی شدید قرار گیرد [19,18].

2-3- بررسی خواص مکانیکی نمونهها

شكل 4 نمودار تنش - كرنش مهندسی كامپوزیت حاصل از آزمون كشش كامپوزیت Al/Cu در پاسهای یک تا سه را نشان می دهد. نتایج حاصل از این آزمون نشان می دهد که با افزایش تعداد پاسهای فرایند APB، استحکام نهایی افزایش یافته است و افزایش قابل توجه استحکام با افزایش تعداد پاسهای APB مشاهده می شود. بیشترین استحکام (375 مگاپاسکال) بدست آمده مربوط به پاس سوم می باشد که که نسبت به ورق آلومینیوم اولیه 3.1 برابر و نسبت به ورق Cu اولیه 2.7 برابر افزایش نشان می دهد. بر اساس تحقیقات انجام شده، تغییرات استحکام کامپوزیت بسیار تغییر شکل داده شده را نه تنها می توان به وسیله دو مکانیزم کرنش سختی و اصلاح دانهها یا استحکام بخشی از طریق مرزدانه ها توجیح کرد بلکه نقش تقویت کنندگی لایه Cu در افزایش استحکام بسیار مؤثر می باشد [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 وایر کات بریده شدند و سپس با دستگاه تست کشش⁴ و با سرعت Imm/min تستها انجام شدند [19]. آزمون میکرو سختی سنجی نیز با دستگاه میکرو هاردنس⁷ 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 میکرساختاری

عكسهاى متالوگرافى از مقطع طولى نمونههاى APB شده از پاسهاى مختلف فرايند در شكل 2 نشان داده شده است. همان طور كه مشاهد مى شود با افزايش تعداد پاسهاى فرايند APB در اثر فشار، ضخامت لايههاى Cu در پاس اول (شكل 2-a) كاهش پيدا كرده و در پاس نهايى فرايند (شكل 2-ch) لايههاى Cu به داخل شبكه آلومينيوم نفوذ كرده و پخش شدگى تكههاى Cu در زمينه آلومينيوم بهبود يافته است. همچنين شكل 3 اتصال بين ورق آلومينيومى و Cu در پاس سوم را نشان مى دهد كه يك اتصال نفوذى بين ورق ها ايجاد شده و تغييرات ضخامت در لايههاى آلومينيوم و Cu مشاهد مى شود بطوريكه ضخامت لايه Cu از 500 ميكرومتر به 212 ميكرومتر كاهش پيدا كرده است كه نسبت به پاس اول حدود %60 و نسبت به ورق Cu كاهش يدا كرده است كه نسبت به پاس اول حدود %60 و نسبت به ورق Cu يكنواخت لايههاى Cu در شبكه آلومينيوم با موفقيت توليد شده است.

عموماً حين تغيير شكل پلاستيک مواد غير مشابه، به دليل خواص مکانیکی فلز پایه (AA1100)، لایههای سختتر (Cu) باریکتر شده و دچار شکست می شوند و تفاوت خواص مکانیکی لایه های غیرمشابه کامپوزیت Al/Cu منجر به تکه تکه شدن (شکستن) غیرهمگن لایههای Cu در شبکه آلومينيوم مى شود [21-24]، مين ⁷و همكاران [24] نشان دادند كه نوارهاى 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 می شوند. در مراحل اولیه فرایند APB طول لایه های Cu بیشتر از فاصله باندهای برشی است در نتیجه این باعث تکه تکه شدن ناهمگن در زمینه آلومینیوم می شود. با ادامه پاس هاس فرایند APB لایه های Cu به وسیله باندهای برشی کوتاهتر شده و در نهایت یک ساختار ماکرو در شبکه آلومينيوم كه Cu به عنوان فاز تقويت كننده مي باشد، توليد شده است. مشاهده می شود که تغییرات ساختاری غیرهمگن مخصوصاً در فصل مشترک شبکه آلومینیوم و لایههای Cu ایجاد شده به دلیل تداخل غیرهمگن شبکه و لایه تقویت کننده می باشد که آن هم به دلیل اختلاف توزیع جریان تنش، اصطکاک بین شبکه آلومینیوم و لایههای Cu و اصطکاک بین زیر کارها (پلیت ها) و سطوح ورقها میباشد.

¹ Model: Zwick/Roell- Z010

² Model: M-400G-GT-G3G3

³ Min

8 7 6 6 4 3 2

کی کے ۲ میں Number of passes Fig. 5 Variation of elongation with number of APB passes APB نمودار تغییرات طول کامپوزیت در پاس،های 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 می شود، همان طور که مشاهده می شود کیفیت اتصال لایه های آلومینیوم و CU مطلوب می باشد بطوریکه فصل مشترک لایه ها در پاس سوم به سختی قابل تشخیص می باشد. با توجه به شکل، نوع شکست کامپوزیت AL/CU از نوع شکست برشی نرم می باشد این نوع شکست با تشکیل و ترکیب حفره های بسیار ریز قبل از ترک و با محدودیت شدید فعالیت نابجایی ها اتفاق می افتد [25,20] این نوع شکست در پژوهش های 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 نابجائیهای 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 آلومینیم میشود و طبق رابطه هال-پچ با کاهش اندازه دانه استحکام افزایش مییابد [28]. همچنین نقش تقویت کنندگی Cu در افزایش استحکام کامپوزیت بسیار مؤثر می باشد. با افزایش تعداد پاسهای فرایند APB، توزیع یکنواختی از ذرات Cu در داخل شبکه آلومینیم اتفاق میافتد و استحکام اتصال بین شبکه و فاز تقویت کننده افزایش مییابد و این پدیده منجر به افزایش استحکام کامپوزیت میشود[20, 29, 20].

تغییرات ازدیاد طول نمونههای APB شده در شکل 5 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش تعداد پاس های فرایند ازدیاد طول نمونه ها نیز افزایش پیدا کرده است و این افزایش ازدیاد طول را می توان به افزایش استحکام اتصال بین لایههای AI و Cu با افزایش تعداد پاسهای فرایند مرتبط دانست چرا که با افزایش تعداد پاسها کرنش افزایش یافته و به دنبال آن فشار لایه ها افزایش می یابد و منجر به بهبود اتصال لایه ها می گردد. نتایج آزمون میکروسختی سنجی در نمودار شکل 6 نشان داده شده است همان طور که مشاهده می شود با افزایش تعداد پاس های APB، سختی لایههای آلومینیوم و Cu روند افزایشی را نشان میدهد. مقدار میکروسختی اندازه گیری شده برای لایه های Al و Cu در پاس اول به ترتیب مقدار VH 52 و 118 می باشد، 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 آلومينيوم اوليه 1.6 برابر افزايش يافته و براى Cu مقدار 152.6HV مىباشد كه نسبت به سختى ورق Cu اوليه 2.6 برابر افزايش يافته است. مشاهده می شود که میکروسختی شبکه آلومینیوم و لایه های 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 نابجایی ها می باشد، با توجه به اینکه افزایش سیکلهای APB باعث کاهش ضخامت لایهها و در نتیجه باعث کاهش اندازه دانهها می شود و باعث افزایش سختی لایه ها می شود [32,31].



Fig. 4 The stress-strain curve of fabricated samples with different number of passes of the APB process $% \left({{{\mathbf{F}}_{\mathbf{F}}}^{T}} \right)$

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. 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 فارسي)
- [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 Engneering 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 submicrometergrained 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, Ultrafine grained bulk aluminum produced by accumulative rollbonding (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 Materilia*, 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 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 (فارس))
- [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 multipass 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 پاس های مختلف فرایند APB، ،APB) 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 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 ازدیاد طول نمونهها نیز با افزایش تعدا پاسها بهبود پیدا کرده است.

صول تموندها نیز با افرایش نعنا پاسها بهبون پیدا نرده است. - مطالعات شکست نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان

داد که نوع شکست کامپوزیت از نوع شکست برشی نرم میباشد.

5- مراجع

- 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 and anisotropy of mechanical properties of the ARBprocessed of the purity Aluminium with interpassing heat treatment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 123-132, 2013. (in Persian فارسي)
- [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*

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.8.0

113

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 Engneering A*, Vol. 271, pp. 306-14, 1999.
- [31] Y.M. Wang, E. Ma, Three strategies to achieve uniform tensile