مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 180-184

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری ماده مرکب Al/Cu/SiC تولید شده به وسیله فرآیند نورد تجمعی متقاطع

داود رحمت آبادی[1]، مسلم طیبی[2]، رامین هاشمی[3*]، بیت‌اله اقبالی[4]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
4- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
* تهران، صندوق‌پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی
دریافت: 08 خرداد 1396
پذیرش: 02 تیر 1396
ارائه در سایت: 22 تیر 1396

کلید واژگان:
فرآیند نورد تجمعی متقاطع
کامپوزیت لایه‌ای Al/Cu
ذرات تقویت‌کننده سیلیسیم‌کاربید
خواص مکانیکی و ریزساختاری

چکیده

در این تحقیق برای اولین‌بار در ساخت کامپوزیت Al/Cu/SiC از فرآیند نوردتجمعی متقاطع استفاده شد. ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های فرآوری شده به‌ترتیب با استفاده از میکروسکوپ نوری، الکترون روبشی، کشش تک‌محوره و میکروسختی بررسی شد. نتایج ریزساختاری نشان داد که بعد از هشت مرحله، کامپوزیت تولید شده، دارای توزیع کاملا یکنواخت از تقویت‌کننده‌ها و پیوند قوی بین ذرات می‌باشد. استحکام کششی در مرحله اول افت پیدا کرد و بعد از آن به‌طور پیوسته افزایش یافت. همچنین روند تغیرات استحکام کششی و ازدیاد طول مشابه بود. مقدار میکروسختی نیز برای لایه‌های آلومینیم و مس نسبت به نمونه‌های اولیه به‌ترتیب 146%و 163% بهبود یافت. بررسی سطوح شکست در مرحله هشتم نشان داد که مکانیزم شکست زمینه آلومینیمی از نوع نرم برشی می‌باشد.

Investigation of mechanical properties and microstructure for Al/Cu/SiC composite produced by Cross Accumulative Roll Bonding process

Davood Rahmatabadi[1], Moslem Tayyebi[2], Ramin Hashemi[1*], Beitallah Eghbali[2]

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. 1684613114 Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Research Note
Received 29 May 2017
Accepted 23 June 2017
Available Online 13 July 2017

Keywords:
CARB process
layered Al/Cu composite
reinforced SiC particles
mechanical properties and microstructure

ABSTRACT

In this investigation, for the first time, Cross Accumulative Roll Bonding was used to produce Al/Cu/SiC composite. Microstructure and mechanical properties of produced composite were evaluated by use of optic microscopy, scanning electron microscopy, uni-axial tensile test, microhardness, respectively. Results of microstructure showed that after eight passes, a perfectly uniform distribution of reinforcing and strong bond between particles could be seen. Tensile strength fell at first and then continuously increased. Also, trend of tensile strength and elongation was similar. Microhardness value for aluminum and copper layers of produced composite enhanced 146% and 163% compared to annealed samples, respectively. Investigation of tensile fracture surface after eight passes showed the mechanism of fracture in shear ductile for Al matrix.

1- مقدمه

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]. مواد مرکب زمینه آلومینیم و مس تقویت شده با کاربید سیلیسیم در مقایسه با آلومینیم و مس دارای چگالی، رسانایی حرارتی و ضریب انبساط حرارتی مناسب‌تر هستند. یکی از روش‌های جدید در ساخت مواد مرکب ریزدانه و حاوی ذرات تقویت‌کننده، روش نورد تجمعی متقاطع است. اساس این فرآیند، روش نورد تجمعی می‌باشد و برای اولین بار در سال 2010، توسط علیزاده با تولید کامپوزیت Al/B_4C ابداع شد [2]. تفاوت روش نورد تجمعی متقاطع با روش نورد تجمعی معمولی در نحوه‌ی تولید مواد مرکب لایه‌ای، چرخش حول محور عمود بر صفحه در هر مرحله می‌باشد. از مزیت‌های روش نورد تجمعی متقاطع نسبت به روش نورد تجمعی معمولی، می‌توان به توزیع بهتر و یکنواخت‌تر ذرات، فرآوری کامپوزیت با تعداد مراحل بیشتر اشاره کرد. در پژوهش حاضر ماده مرکب Al/Cu/SiC با استفاده از فرآیند نورد تجمعی متقاطع تولید شد و خواص ریزساختاری و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت.

2- روش تحقیق

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, B. Eghbali, Investigation of mechanical properties and microstructure for Al/Cu/SiC composite produced by Cross Accumulative Roll Bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 180-184, 2017 (in Persian)

در این پژوهش از ورق‌های آلومینیم 1020 و مس خالص با ضخامت یکسان 0.5 میلی‌متر و پودر سیلیسیم کاربید با اندازه ذرات کمتر از 15-10 میکرومتر استفاده شده است. ابتدا ورق‌های اولیه آلومینیم و مس در دما و زمان مشخص آنیل شدند. تولید کامپوزیت لایه‌ای به وسیله‌ی فرآیند نورد تجمعی متقاطع دارای دو مرحله شامل تهیه‌ی ساندویچ اولیه و فرآیند نورد تجمعی متقاطع بوده است. "شکل 1" مراحل مختلف ساخت ساندویچ اولیه ارائه شده است. به‌منظور ساخت کامپوزیت اولیه و مطابق با "شکل 1"، از 6 ورق آلومینیم و 2 ورق مس با ابعاد یکسان استفاده شد. در ابتدا ورق‌های اولیه تحت عملیات آماده‌سازی شامل چربی‌زدایی با استون و خشن‌کاری به‌وسیله‌ی برس‌سیمی می‌باشد. سپس مقدار 2% حجمی کاربید سیلیسیم بین فصل-مشترک‌های لایه‌های Al/Al و Al/Cu ریخته شد. طرز قرار گرفتن لایه‌ها به‌گونه‌ای است که لایه‌های خارجی را ورق‌های آلومینیم تشکیل داده شده است و ورق‌های مسی در لایه‌های میانی قرار گرفته‌اند. همچنین پس از روی هم قرار دادن ورق‌ها از چهار طرف با استفاده از سیم فولادی محکم به یکدیگر بسته شدند و تحت نورد با کاهش ضخامت اولیه 66% در دمای اتاق قرار گرفتند. پس از آماده‌سازی ساندویچ اولیه و مطابق با "شکل 2" کامپوزیت-های اولیه تولید شده ابتدا در جهت محور عمود بر صفحه 90 درجه چرخانده شدند. سپس در راستای طولی به‌صورت دو قسمت کاملا برابر بریده شده و آماده‌سازی سطحی انجام گرفت. سپس سطوح برس خورده بدون اضافه کردن پودر روی هم قرار داده شدند و توسط سیم فولادی محکم بسته شدند و تحت کاهش ضخامت 50% قرار گرفتند و این فرآیند تا 8 مرحله تکرار شد. در هر مرحله نمونه نسبت به جهت مرحله قبلی 90 درجه حول محور عمود برصفحه می‌چرخد. خواص مکانیکی توسط آزمون‌های‌کشش و میکروسختی و بررسی‌های ریزساختاری و شکست‌نگاری به‌ترتیب به‌وسیله میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی در مراحل مختلف فرآیند نورد تجمعی متقاطع مورد بررسی قرار گرفت.

3-نتایج و بحث

3-1- بررسی ریزساختار

در "شکل 3" تصاویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت Al/Cu/SiC در مراحل مختلف فرآیند نورد تجمعی متقاطع نشان داده شده‌اند. در مراحل ابتدایی به وضوح ناپایداری پلاستیکی در لایه‌های تقویت کننده‌ی مس مشاهده می‌شود (دایره‌های سبز و فلش‌های آبی رنگ). باتوجه به نتایج گزارش شده در

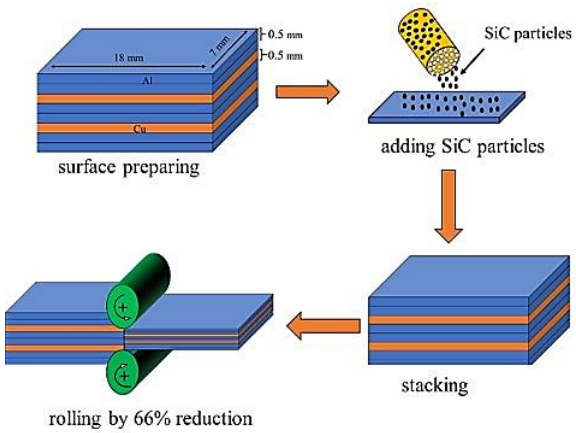

Fig. 1 Schematic illustration for production of primary sandwich

شکل 1 طرح واره توضیحی برای ساخت ساندویچ اولیه

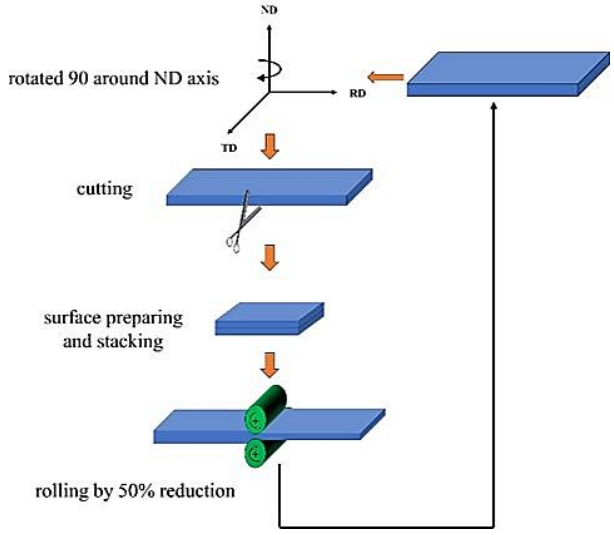

Fig. 2 Schematic illustration of CARB process

شکل 2 طرح واره فرآیند نورد تجمعی متقاطع

پژوهش‌های پیشین عواملی همچون تمرکز تنش ناشی از وجود ذرات تقویت‌کننده، اختلاف در خواص سیلان تقویت‌کننده‌ها و زمینه فلزی و کرنش‌های برشی موجود در فصل مشترک‌ها سبب می‌شود که ناپایداری‌های پلاستیک ایجاد شود [4,3]. همچنین ذرات تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم - موجود در فصل مشترک‌های Al/Al و Al/Cu با استفاده از مستطیل های منقطع مشکی رنگ در "شکل 3(a)" نشان داده شده‌اند. با افزایش کرنش اعمالی ذرات نسبتا به مراحل اولیه در کامپوزیت توزیع و حالت یکنواخت‌تری پیدا کردند و از مابین فصل مشترک‌ها به داخل زمینه و تقویت کننده مس نفوذ کردند. همچنین توزیع لایه‌ها مس نسبت به مراحل ابتدایی یکنواخت شد (شکل 3 قسمت (d)). "شکل 4" تصاویر میکروسکوپ نوری نحوه‌ی توزیع ذرات کاربید سیلیسیم در کامپوزیت Al/Cu/SiC را نشان می‌دهد. در "شکل 4" قسمت (a) و (b) (دایره‌های منقطع و ممتد مشکی رنگ به‌ترتیب تخلخل و ذرات سیلیسیم کاربید را نشان می‌دهند) به‌وضوح ذرات تقویت-کننده کاربید سیلیسیم و تخلخل در فصل مشترک‌های Al/Al و Al/Cu مشاهده می‌شود. در مراحل ابتدایی فرآیند نورد تجمعی متقاطع (ساندویچ اولیه و مراحل اول و دوم)، تشخیص فصل مشترک‌ها امکان‌پذیر و ساختار لایه‌ای نمایان است، ولی با افزایش تعداد مراحل، ساختار لایه‌ای کمتر می‌شود و تشخیص فصل مشترک‌ها به‌شدت سخت می‌شود به گونه‌ای‌که در پایان مرحله هشتم Al/Cu/SiC متشکل از 2048 لایه می‌باشد. این افزایش تعداد لایه‌ها نشان می‌دهد که پیوند مابین لایه‌ها نسبت به مراحل ابتدایی فرآیند نورد تجمعی متقاطع مستحکم‌تر شده و ذرات در راستای ضخامت، طول و عرض توزیع می‌شوند و موجب همگن‌تر شدن و توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در کامپوزیت Al/Cu می‌شود (مطابق با شکل 4 قسمت (d)).

3-2- شکست نگاری

"شکل 5" سطح مقطع شکست کامپوزیت فرآوری شده بعد از هشت مرحله نورد تجمعی متقاطع را نشان می‌دهد. به‌طور واضح ذرات کاربید سیلیسیم در مرکز حفرات و فصل مشترک‌ها مشاهده می‌شود. بنابر تحقیقات انجام شده به‌طور کلی دو نوع مکانیزم شکست نرم وجود دارد. الف) شکست نرم (رشد حفرات و بهم پیوستن آن‌ها و در نهایت شکست) ب) شکست نرم برشی (برش پیوندهای حفرات داخلی). مکانیزم شکست دوم منجر به ایجاد میکرو

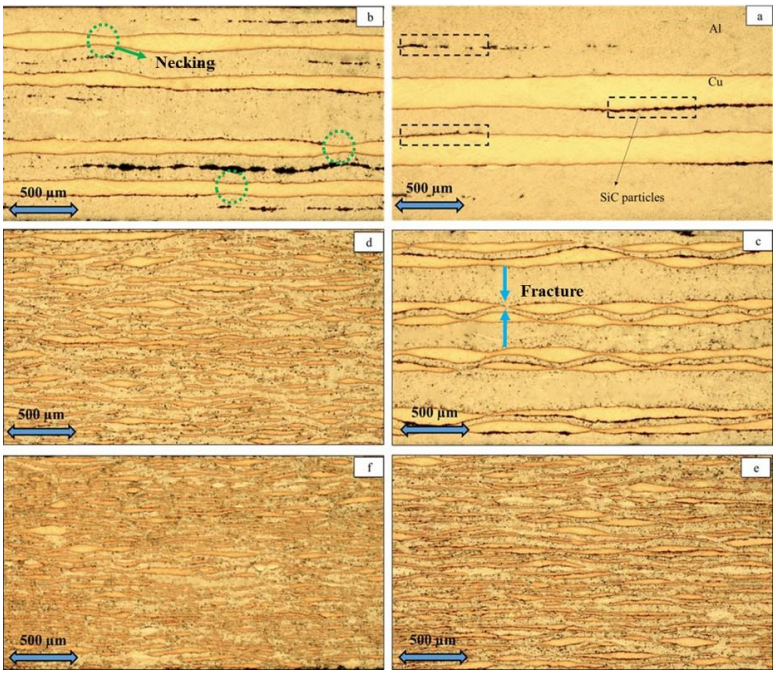

Fig.3 Microstructure of Al/Cu/SiC for different CARB cycle: (a) primary sandwich, (b) first, (c) second, (d) fifth, (e) sixth and (f) eighth pass

شکل 3 ریزساختار Al/Cu/SiC برای مراحل مختلف فرآیند نورد تجمعی متقاطع: (a) ساندویچ اولیه، (b) اول، (c) دوم، (d) پنجم، (e) ششم و (f) مرحله هشتم

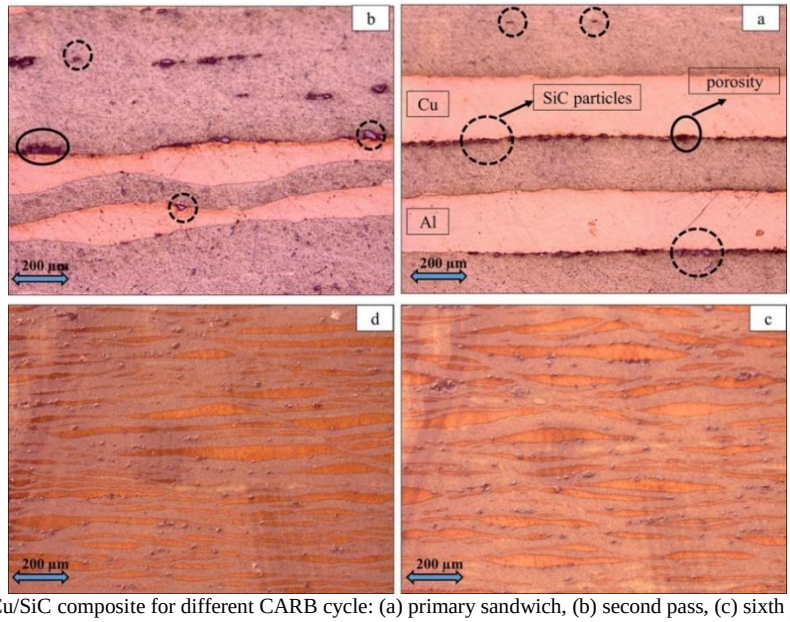

Fig.4 Microstructure of Al/Cu/SiC composite for different CARB cycle: (a) primary sandwich, (b) second pass, (c) sixth pass and (d) eighth pass

شکل 4 ریزساختار کامپوزیت Al/Cu/SiC برای مراحل مختلف فرآیند نورد تجمعی متقاطع: (a) ساندویچ اولیه، (b) مرحله دوم ، (c) مرحله ششم و (d) مرحله هشتم

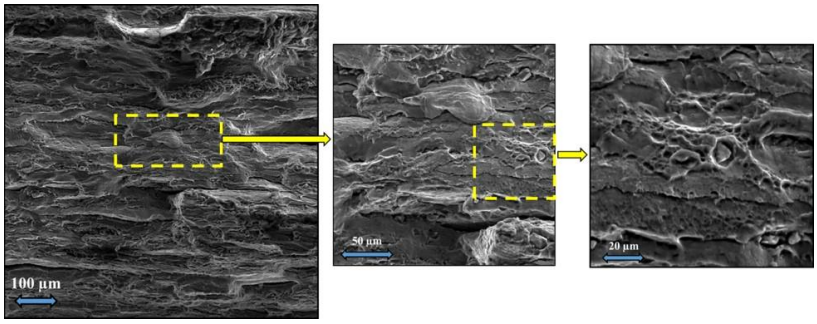

Fig.5 Tensile fracture surfaces of Al/Cu/SiC composite produced by CARB process after eight pass

شکل 5 سطح مقطع شکست برای کامپوزیت Al/Cu/SiC تولید شده با روش فرآیند نورد تجمعی متقاطع پس از پاس هشتم

حفرات کوچک و کشیده می‌شود. که در پژوهش حاضر نیز مکانیزم شکست در مرحله هشتم تشکیل حفرات ریز و کشیده و در نهایت شکست می‌باشد [6,5].

3-3- خواص مکانیکی

مطابق با "شکل 6" که بیانگر تغییرات ریز سختی آلومینیم و مس می‌باشد، مشاهده می‌شود که در مراحل ابتدایی و انتهایی نورد تجمعی متقاطع مقدار میکروسختی ویکرز برای هر دو لایه افزایش می‌یابد، البته این نرخ افزایش برای در پاس‌های اول فرآیند به‌مراتب بیشتر از مراحل نهایی می‌باشد. بنابر تحقیقات قبلی انجام شده، افزایش سریع سختی در پاس‌های ابتدایی فرآیند نورد تجمعی به بالا بودن نرخ کارسختی و در پی آن تشکیل مرزهای فرعی نسبت داده شده است [7,4]. همچنین در مراحل نهایی تقریبا مقدار میکروسختی ثابت شده و اشباع می‌شود. بیشترین مقدار میکروسختی برای هر دو لایه به‌ترتیب مقادیر 59.7 و 127.8 ویکرز برای آلومینیم و مس می‌باشد که نسبت به نمونه‌های آنیل‌شده اولیه 149% و 163% افزایش مشاهده می‌شود. اختلاف در تغییرات ریز سختی در پاس‌های اولیه در هر دو لایه را می‌توان به نرخ کار سختی دو لایه در حین تغییر شکل پلاستیک شدید نسبت داد. علت این اختلاف می‌تواند تفاوت در انرژی نقص چیده شدن دو فلز باشد [4,3].

در "شکل 7" که تغییرات استحکام کششی و ازدیاد طول برحسب تعداد پاس نورد تجمعی متقاطع نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که استحکام کششی و ازدیاد طول در مرحله یک کاهش یافته است و بعد از آن، با افزایش مراحل فرآیند به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابند. همچنین همان‌طور که در "شکل 7" مشاهده می‌شود، نرخ افزایش در مراحل ابتدایی بیشتر می‌باشد. بیشترین مقدار استحکام کششی در پایان مرحله هشتم به‌دست می‌آید که مقدار آن به 342 مگاپاسکال رسید، که نسبت به ورق‌های آنیل شده اولیه (آلومینیم و مس) به ترتیب 5.65 و 2.58 برابر افزایش مشاهده می‌شود. علت افت استحکام کششی در مرحله اول فرآیند نورد تجمعی متقاطع را می‌توان به سبب وجود تخلخل و پیوند نامناسب مابین فصل مشترک‌های Al/Al و Al/Cu برشمرد (شکل 4 قسمت (a) و (b)). همچنین علت افت شدید ازدیاد طول در مرحله اول، انجام کار سرد، اعمال کرنش بالا و تغییر شکل شدید پلاستیک می‌باشد. همچنین دلیل افزایش استحکام در مراحل انتهایی فرآیند را به‌دلیل عواملی مانند توزیع تقویت‌کننده‌ها، بهبود کیفیت اتصال لایه‌ها و همچنین ریزدانه شدن دانست. (شکل 4 قسمت (d)). گزارش شده که حین تغییر شکل پلاستیک شدید، ترک‌ها از فصل مشترک زمینه و تقویت‌کننده‌ها شروع به پیشرفت می‌کنند و به یکدیگر الحاق می‌یابند [7,4].

4- نتایج

در پژوهش حاضر برای اولین بار کامپوزیت Al/Cu/SiC در هشت مرحله فرآیند نورد تجمعی متقاطع تولید شد و خواص مکانیکی و ریزساختاری مورد بررسی قرار گرفت که برجسته ترین نتایج به شرح زیر می‌باشد:

1. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد تجمعی متقاطع، توزیع تقویت‌کننده‌ها در زمینه آلومینیمی بهبود می‌یابد و در پاس هشتم کامپوزیتی متشکل از 2048 لایه به‌وجود آمد.

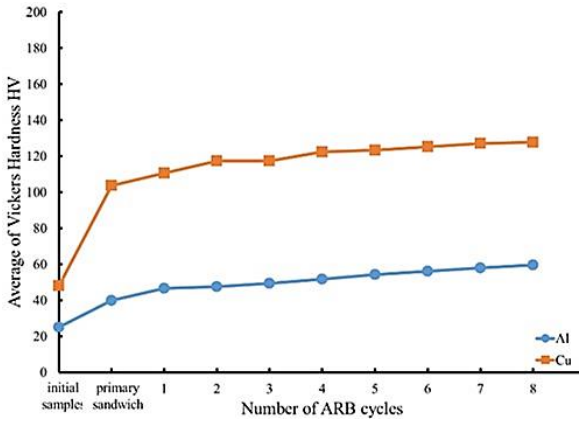

Fig.6 Microhardness variation for Al and Cu layers at the different cycles of Cross Accumulative Roll Bonding process

شکل 6 تغییرات میکروسختی برای لایه‌های آلومینیم و مس در پاس‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی متقاطع

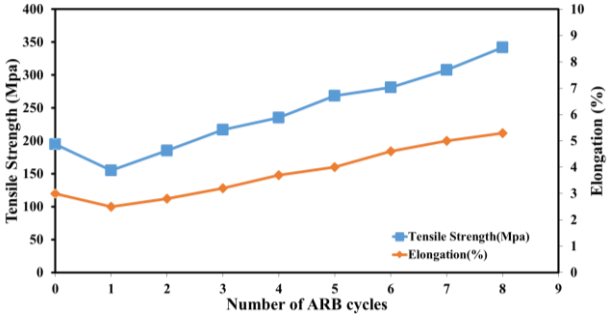

Fig.7 variation of strength and elongation at the different cycles of CARB process

شکل 7 تغییرات استحکام و ازدیادطول در مراحل فرآیند نورد تجمعی متقاطع

2. مقدار ریزسختی برای لایه‌های هر دو نمونه به‌طور پیوسته افزایش یافت و بیشترین مقدار در پاس اخر برای نمونه‌های آلومینیم و مس به‌ترتیب 59.7 و 127.8 به‌دست آمد.
3. بیشترین مقدار استحکام کششی در پایان پاس هشتم حاصل می‌شود که به مقدار 342 مگاپاسکال رسید، که این مقدار 5.65 برابر استحکام آلومینیم اولیه می‌باشد.
4. سطح مقطع شکست زمینه آلومینیمی کامپوزیت فرآوری شده در پاس هشتم از نوع نرم برشی می‌باشد.

5- مراجع

[1] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, 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.

[2] M. Alizadeh, Comparison of nanostructured Al/B_4C composite produced by ARB and Al/B_4C composite produced by RRB process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 2, pp. 578-582, 2010 .

[3] V. Y. Mehr, A. Rezaeian, M. R. Toroghinejad, Application of accumulative roll bonding and anodizing process to produce Al–Cu–Al_2O_3 composite, *Materials & Design*, Vol. 70, pp. 53-59, 2015.

[4] A. Shabani, M. R. Toroghinejad, A. Shafyei, Fabrication of Al/Ni/Cu composite by accumulative roll bonding and electroplating processes and investigation of its microstructure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, No. 12, pp. 386-393, 2012.

[5] Z. Xing, S. Kang, H. Kim, Structure and properties of AA3003 alloy produced by accumulative roll bonding process, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, No. 4, pp. 717-722, 2002.
[6] P. D. Motevalli, B. Eghbali, Microstructure and mechanical properties of Tri-metal Al/Ti/Mg laminated composite processed by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 628, No. 3, pp. 135-142, 2015.
[7] 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, No. 12, pp. 63-72, 12/15/, 2011.