

## بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
 کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
 دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مسلم طیبی  
 داود رحمت آبادی  
 رضا رشیدی  
 رامین هاشمی\*

### چکیده

در این پژوهش کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/منیزیم با روش پیوند سرد نوردی تولید شد. همچنین خواص مکانیکی، شکست‌نگاری و ریزساختار با استفاده از آزمون کشش تک-محوره، میکروسختی، عکس‌برداری از سطح مقطع شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده حاکی از افزایش استحکام و میکروسختی برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/منیزیم نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس خالص و منیزیم است که عامل اصلی این افزایش اعمال کرنش زیاد و کار سرد می‌باشد. استحکام کششی برای نمونه‌ی تولید شده به ۲۲۰/۳ مگاپاسکال رسید که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم مس و منیزیم به ترتیب ۱۴۴٪، ۲۳٪ و ۲۹٪ افزایش یافت. عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی نشان داد که سطح مقطع شکست لایه‌های آلومینیوم و مس نرم، در صورتیکه سطح مقطع شکست لایه منیزیم کاملاً ترد است.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/منیزیم، پیوند سرد نوردی، خواص مکانیکی، شکست‌نگاری و ریزساختار.

## Investigation of Microstructure and Mechanical properties for Multi-layered Al/Cu/Mg Composite Produced by Cold Roll Bonding

M. Tayyebi  
 D. Rahmatabadi  
 R. Rashidi  
 R. Hashemi

Department of Material Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran  
 School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
 Department of Material Engineering, Tehran University, Tehran, Iran  
 School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In the present study, Al/Cu/Mg layered composite was produced through cold roll bonding (CRB). Also, mechanical properties, fractography, and microstructure were investigated through uniaxial tensile test, microhardness, scanning electron and optic microscope. Results of carried out tests, showed the value of tensile strength and microhardness for Al/Cu/Mg layered composite. Comparing to initial Al 1050, pure Cu and Mg AZ31B, the value of tensile strength increased. The main cause of this increase was applying high strain and cold working. Value of tensile strength for Al/Cu/Mg layered composite received 220.3MPa that compared to initial Al 1050 and pure Cu and Mg AZ31B, enhanced 144%, 23%, and 29%, respectively. Results of SEM demonstrated that ductile fracture mechanism governed for Al and Cu layers, but fracture surface of Mg layer was a brittle fracture.

**Keywords:** Multi-layered Al/Cu/Mg composite, Cold Roll Bonding, mechanical properties, fracturgraphi and microstructure.

قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. فرآیند پیوند سرد نوردی توسط محققین با اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد [۱۰-۶] پیوند به وسیله نورد سرد [۱۱] پوشش به وسیله نورد [۱۲] پیوند سرد نوردی [۱۳، ۱۴] معرفی شده است. پیوند سرد نوردی، نوعی جوشکاری حالت جامد می‌باشد، که پیوند آن بر اثر تغییرشکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات پیوند ایجاد می‌شود [۱۵-۱۷]. در این روش پیوند زمانی ایجاد می‌شود که انبساط سطحی در سطوح ورق‌ها ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار باید به اندازه کافی زیاد باشد به طوری که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود که این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [۱۳، ۱۵، ۱۷-۲۰]. این فرآیند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، که این مواد می‌توانند از یک جنس باشند و یا جنس‌های مختلفی را دارا باشند، علاوه بر این فلزاتی که به وسیله جوش

### ۱- مقدمه

درسال‌های اخیر، کامپوزیت‌های فلزی چند لایه به سبب خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱، ۲]. مطالعات انجام گرفته بر روی کامپوزیت‌های چند لایه حاکی از بهبود خواصی مانند چقرمگی شکست، رفتار خستگی، انعطاف‌پذیری، خواص سایشی و غیره می‌باشد [۳]. در میان فلزات پرکاربرد برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی، آلومینیوم به سبب خصوصیات ویژه مورد توجه بیشتر قرار گرفته است [۴]. از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلیاژهای چندلایه، روش پیوند سرد نوردی در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های کاربردی منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش‌های دیگر رشد و توسعه سریعی داشته است [۵]. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن این روش و همچنین

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: rhashemi@just.ac.ir

خواص مکانیکی و ریزساختار آن با استفاده از آزمون‌های مختلف نظیر آزمون کشش تک‌محوره، آزمون میکروسختی ویکرز برای هر لایه به-صورت مجزا (لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم)، شکست‌نگاری به وسیله میکروسکوپ روبشی الکترونی و میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت و با نمونه‌های اولیه مقایسه شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- فرآیند پیوند سرد نوردی

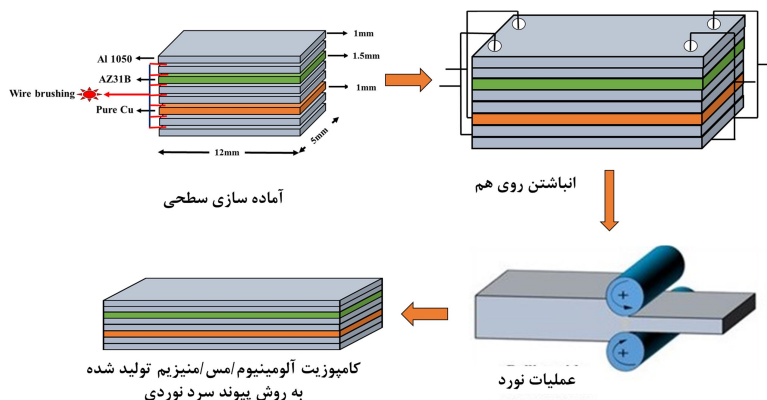
خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی ورق‌های اولیه استفاده شده در این پژوهش (آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس خالص با ضخامت ۱ میلی‌متر و منیزیم با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر) در "جدول ۱" ارائه شده است. به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریزساختاری و سطح مقطع شکست کامپوزیت لایه‌های آلومینیوم/مس/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، ابتدا نمونه‌های اولیه (شش ورق آلومینیوم ۱۰۵۰، یک ورق مس خالص و یک ورق منیزیم) در ابعاد یکسان ۱۲۰ میلی‌متر طول، ۵۰ میلی‌متر عرض بریده شدند. طرحواره فرآیند نورد سرد پیوندی در "شکل ۱" نشان داده شده است. بر این اساس پس از آماده‌سازی، نمونه‌های اولیه با استفاده از حمام استون چربی‌زدایی شده و توسط برس سیمی فولادی خشن‌کاری شدند [۳۸]. و سپس ورق‌ها بر روی هم قرار داده شدند و به منظور جلوگیری از لغزش آن‌ها بر روی هم، نمونه‌ها از چهار طرف سوراخ شده و توسط سیم فولادی بهم محکم بسته شدند و در نهایت کاهش ضخامت ۶۶٪ با استفاده از دستگاه نورد بین آن‌ها پیوند برقرار شد. به‌منظور جلوگیری از اکسید شدن لایه‌های سطحی، زمان بین آماده‌سازی سطوح و عملیات نورد کمتر از ۱۵۰ ثانیه در نظر گرفته شد [۳۸].

جدول ۱- خواص اولیه آلومینیوم ۱۰۵۰، مس خالص و منیزیم AZ31B

ماده	ترکیب شیمیایی (%)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	میکروسختی (ویکرز)
آلومینیوم ۱۰۵۰	-	۹۰.۵	۲۵
مس خالص	-	۱۷۹.۵۶	۷۴.۵
منیزیم AZ31B	Mg 95.8, Al 3, Zn 1, Mn 0.2	۱۷۰.۳۵	۶۷.۳

سنتی نمی‌توان به‌هم جوش زد را می‌توان با این روش بهم اتصال داد [۶، ۱۸]. در اوایل سال‌های ابداع این روش، آن‌را به‌عنوان یک روش امیدبخش برای تولید انبوه ورق و فویل قلمداد می‌کردند [۲۱-۲۳].

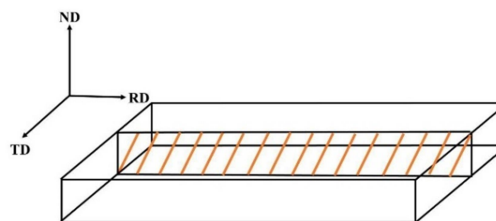
در سال‌های اخیر از فرآیند پیوند سرد پیوندی به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل لایه‌ای بزرگ استفاده می‌شود [۱۸]. مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای حاکم باند به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال انجام شده است، و شرایط روند به خوبی تعریف شده است. گزارش شده است که پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [۱۴، ۱۹، ۲۰، ۲۴-۲۶]، دمای اتصال [۱۶، ۲۵]، زمان آبلینگ قبل و بعد از فرآیند [۲۶-۲۸]، سرعت نورد [۲۵، ۲۶، ۲۹، ۳۰] ضخامت اولیه [۲۵، ۲۶]، جهت نورد [۲۶]، و حضور ذرات بین ورق [۳۱، ۳۲] می‌باشد همچنین پیوند سرد نوردی به منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، از قبیل آلومینیوم [۱۸]، فولاد [۳۳]، مس [۳۴]، کامپوزیت آلومینیوم/مس [۲]، آلومینیوم/تیتانیوم [۳۵]، آلومینیوم/منیزیم [۳۶]. در این تحقیق برای اولین کامپوزیت چندلایه با سه جنس مختلف آلومینیوم، منیزیم و مس با استفاده از روش پیوند سرد نوردی و در دمای محیط تولید شده است. منیزیم با توجه به شکل‌پذیری بسیار پایین به خصوص در دمای محیط، علاوه بر خواص مطلوبی مانند چگالی پایین و نسبت استحکام به وزن بالایی که دارد، کمتر مورد استفاده و بررسی قرار گرفته شده است. همچنین اختلاف در ساختار کریستالی آلومینیوم، مس و منیزیم می‌تواند سبب تغییرات ریزساختاری و مکانیکی حین فرآیند نورد نسبت به دیگر سیستم‌ها که فلز زمینه و تقویت‌کننده‌ها دارای ساختاری کریستالی یکسانی هستند شود [۳۷]. هدف از این پژوهش ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم با تقویت‌کننده‌های فلزی مس و منیزیم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی می‌باشد، به‌همین علت لایه‌های مس و منیزیم در وسط قرار گرفته‌اند تا حین نورد با اعمال نیرویی که از طریق زمینه آلومینیومی به تقویت‌کننده‌ها وارد شود، باعث تشکیل پیوند مناسب بین لایه‌ها شود. آلومینیوم به‌دلیل ساختار FCC و شکل‌پذیری بالا، قابلیت برقراری پیوند مناسب با هر دو تقویت‌کننده مس و منیزیم در دمای محیط را دارد. به‌همین منظور نیز بین لایه‌های مس و منیزیم از ورق آلومینیومی استفاده شده است. همچنین پس از ساخت نمونه‌های کامپوزیتی،



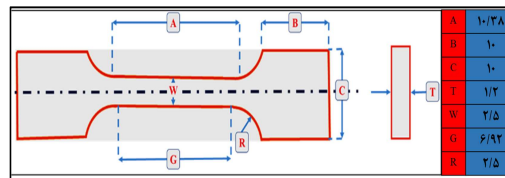
شکل ۱- طرحواره فرآیند پیوند سرد نوردی

## ۲-۲- بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری

در این پژوهش خواص مکانیکی کامپوزیت فرآوری شده آلومینیوم/مس/منیزیم به وسیله آزمون‌های کشش تک‌محوره و میکروسختی ویکرز مورد تحقیق قرار گرفت. همچنین خواص ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ نوری مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه و پس از آزمون کشش، سطح مقطع شکست نمونه‌های اولیه و کامپوزیت فرآوری شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفته شدند. برای نمونه‌های اولیه مس خالص، آلومینیوم ۱۰۵۰، منیزیم خالص و نمونه کامپوزیتی تولید شده، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد بوسیله ماشین وایرکات و مطابق با طرحواره "شکل ۲" بر اساس استاندارد JIS آماده شد. اندازه‌ی قسمت‌های مختلف در نمونه‌ی آماده‌سازی شده براساس استاندارد JIS در شکل ۳ ارائه شده است. آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش  $s=1 \times 10^{-4}$  و با استفاده از دستگاه ستام انجام شد. سختی‌سنجی نمونه‌ها تحت بار ۲۰۰ گرم و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) با استفاده از دستگاه جنیوس اندازه‌گیری شد. برای هر نمونه آزمون میکروسختی ویکرز در بیش از ۱۰ نقطه اندازه‌گیری شد و سپس با حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، اندازه میکروسختی از میان‌گیری داده‌ها به دست آمد. جهت بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری مدل توسن<sup>۱</sup> استفاده شد. قبل از انجام آزمون‌های میکروسختی و بررسی ریزساختار، جهت تسهیل در جابه‌جایی نمونه‌ها از مانت سرد استفاده شد. پس از مانت نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه پولیش و با استفاده از سنباده‌های ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ برای میکروسختی و سنباده‌های ۸۰۰ تا ۵۰۰۰ برای بررسی ریزساختار (عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ نوری) پرداخت شد. میکروسختی برای هر نمونه به صورت تصادفی در بیش از ۱۰ نقطه مختلف اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد.



شکل ۲- جهت‌های مختلف فرآیند و طرحواره نمونه‌ی کشش آماده-سازی شده با استفاده از ماشین وایرکات

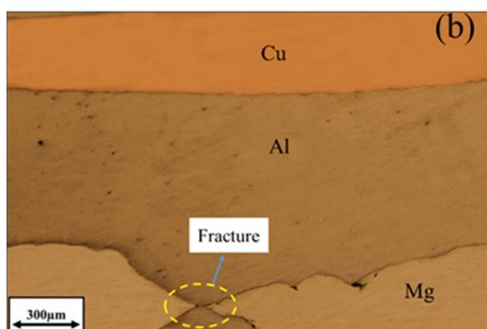
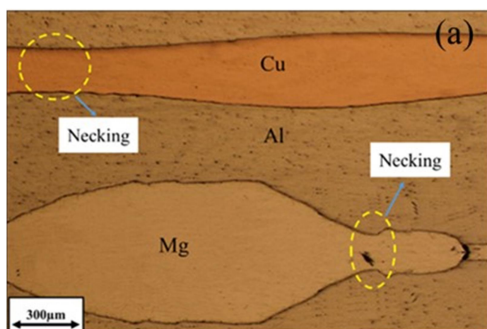


شکل ۳- ابعاد نمونه‌های آزمون کشش استفاده شده براساس استاندارد جی ای اس

## ۳- نتایج و تفسیر آن

### ۳-۱- خواص مکانیکی و ریزساختار

در "شکل‌های ۴" تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم ارائه شده است. در این تصاویر ناپایداری پلاستیکی و چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌های آلومینیوم-آلومینیوم، آلومینیوم-مس و آلومینیوم-منیزیم مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیوند قوی و مناسب و بدون هیچ‌گونه انفصال بین لایه‌های آلومینیوم-مس و آلومینیوم-منیزیم برقرار شده است و لایه‌ها کاملاً بهم پیوند خورده‌اند. همچنین نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره (استحکام بالای کامپوزیت تولید شده) نیز بیانگر و تاییدکننده پیوند مناسب بین لایه‌ها می‌باشد. در شکل ۴ ناپایداری‌های پلاستیک (گلوبی<sup>۲</sup> و شکست<sup>۳</sup>) در لایه‌های تقویت‌کننده مشاهده می‌شود. در شکل (a) ۴، گلوبی شدن در هر دو لایه تقویت‌کننده منیزیم و مس مشاهده می‌شود. بنابر تحقیقات قبلی و گزارشات انجام شده، ناپایداری‌های پلاستیک به سبب اختلاف در خواص سیلان تقویت‌کننده‌ها و زمینه رخ می‌دهد [۳، ۱۶، ۳۹]. از مقایسه دو "شکل ۴" یافت می‌شود که گلوبی شدن و شکست در تقویت‌کننده منیزیم سریع‌تر نسبت به لایه مس رخ می‌دهد که این امر را می‌توان به شکل-پذیری کم منیزیم نسبت به مس نسبت داد. گزارش شده است که کرنش مورد نیاز برای شکست نسبت به گلوبی شدن بیشتر است [۳۹].

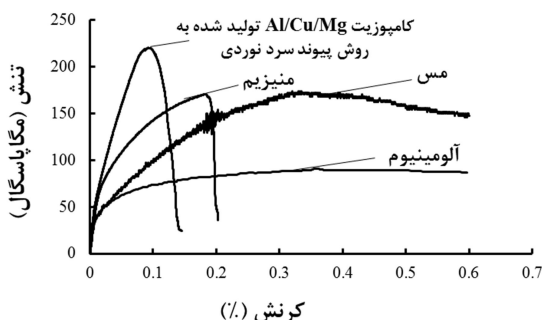


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی، (a) گلوبی در لایه‌های منیزیم و مس، (b) شکست در لایه‌ی منیزیم

<sup>۲</sup> necking  
<sup>۳</sup> fracture

<sup>۱</sup> Tuscen

افزایش سختی بوده‌اند [۴۰]. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در "جدول ۲" علاوه بر افزایش میکروسختی برای همه‌ی لایه‌ها مشاهده می‌شود که درصد افزایش میکروسختی برای لایه‌ی آلومینیومی بیشتر است به‌طوری که این افزایش به ترتیب برای آلومینیوم ۱۳۶٪، برای مس ۸۴٪ و برای منیزیم ۴۱٪ می‌باشد. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی برای نمونه‌های آلومینیوم مس و منیزیم را می‌توان اختلاف انرژی نقش در چیدمان ورق‌های اولیه دانست [۴]. منیزیم، مس و آلومینیوم به‌ترتیب دارای انرژی نقص چیده شدن ۲۰۰، ۸۶ و ۱۶۶ mJm<sup>-2</sup> می‌باشد. انرژی نقص چیده شدن پایین، سبب افزایش فاصله مابین نایجایی‌ها شده و در نتیجه ترکیب شدن نایجایی‌ها و لغزش متقاطع مشکل‌تر می‌شود. در واقع فلزات دارای انرژی نقص چیده شدن کم (مس) مانعی در مقابل لغزش متقاطع و صعود می‌باشند که این دو از عوامل مهم و مؤثر در ایجاد بازیابی در مقایسه با فلزات با انرژی نقص چیده شدن بالا (منیزیم) می‌باشند [۴، ۳۷، ۴۱]. در نتیجه انرژی نقص چیده شدن پایین مس نسبت به دو فلز دیگر موجب افزایش چگالی نایجایی‌ها و نرخ کارسختی بالاتر و در پی آن تعویق در بازیابی می‌شود [۴].



شکل ۵- نمودار تنش - کرنش مهندسی ورق‌های اولیه و کامپوزیت لایه‌ای فرآوری شده آلومینیوم/مس/منیزیم با استفاده از پیوند سرد نوردی

### ۲-۳- شکست‌نگاری

"شکل ۶" سطح مقطع شکست برای لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم در کامپوزیت چندلایه‌ی آلومینیوم/مس/منیزیم را پس از آزمون کشش تک‌محوره نشان می‌دهد. براساس همین شکل مشاهده می‌شود که خاصیت لایه‌ای بودن به وضوح مشخص است. همچنین سطح مقطع شکست لایه‌های آلومینیوم و مس از نوع شکست نرم همراه با حفرات و میکروحفرات می‌باشد در صورتی که سطح مقطع شکست لایه تقویت‌کننده منیزیم به صورت شکست ترد می‌باشد. اکثر آلیاژهای ساختمانی هنگامی که تحت اعمال بار قرار می‌گیرند به‌سبب پیوستگی حفرات دچار شکست می‌شوند. این اتفاق در نمونه‌های آلومینیوم و مس نیز مشاهده می‌شود. ریزحفرات در نواحی مانند آخال‌ها، مرزخانه‌ها، نواحی تجمع نابه‌جایی‌ها و نواحی دارای ناپوستگی موضع کرنش جوانه‌زنی می‌کنند. شکست نرم در مواد با چگالی نابه‌جایی پایین که سطح شکست در آن‌ها با حفرات عمیق ریشه‌دار و به‌صورت نیمه کروی رخ می‌دهد.

محققان بسیاری فرآیند نورد سرد را توسط ابزارهایی مانند میکروسکوپ نوری<sup>۱</sup>، میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۲</sup>، میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> و سایر ابزارها مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۸]. محققان چهار نظریه را در مورد فرآیند پیوند سرد نوردی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نظریه فیلم، نظریه سد انرژی، نظریه اتصال نفوذی و نظریه تبلور مجدد [۳۸]. طبق نظر محققان نظریه فیلم مهم‌ترین نظریه در اتصال نوردی سرد است. در حقیقت با این روش اتصال مکانیکی به علت نیروی جاذبه بین اتم‌ها ایجاد می‌شود. در روش اتصال سرد نوردی چون دما پایین بوده و همچنین مدت زمانی که فلزات در زیر غلتک-های نورد در تماس با هم قرار می‌گیرند اندک می‌باشد فرآیند نفوذ قابل چشم‌پوشی است. نظریه فیلم بیان می‌کند که در طی نورد لایه‌های سطحی هر دو فلز کنار هم شکسته شده و تحت فشار نورد، فلزات از لایه‌لای ترک‌های ایجاد شده در لایه سطحی اکستروژد می‌شوند و سپس اتصال اتم به اتم برقرار می‌شود [۳۸].

"شکل ۵" نمودار تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم/مس فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی و نمونه‌های اولیه استفاده شده در این پژوهش (آلومینیوم ۱۰۵۰، مس خالص و منیزیم AZ31B) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام کششی نهایی برای کامپوزیت تولید شده آلومینیوم/مس/منیزیم به‌مراست با لاتر از استحکام مواد اولیه آلومینیوم، مس و منیزیم می‌باشد و مقدار آن برای نمونه‌ی کامپوزیتی به 220.3 مگاپاسکال می‌رسد که نسبت به هر کدام از نمونه‌های اولیه آلومینیوم، مس خالص و منیزیم به ترتیب ۱۴۴٪، ۲۷٪ و ۲۹٪ افزایش یافته است. البته مقدار ازدیاد طول برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به مواد اولیه (حتی منیزیم) کمتر می‌باشد که البته با توجه به اعمال کرنش زیاد (بیشتر از ۶۰٪) و کارسرد در دمای محیط، افزایش استحکام کششی (بیش از ۲/۵ برابر نسبت به نمونه اولیه آلومینیوم) و کاهش ازدیاد طول نسبت به نمونه‌های اولیه، کاملاً منطقی و قابل پیش‌بینی می‌باشد. همچنین تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز روند تغییرات در خواص مکانیکی بدست آمده در کار حاضر را تایید می‌کند.

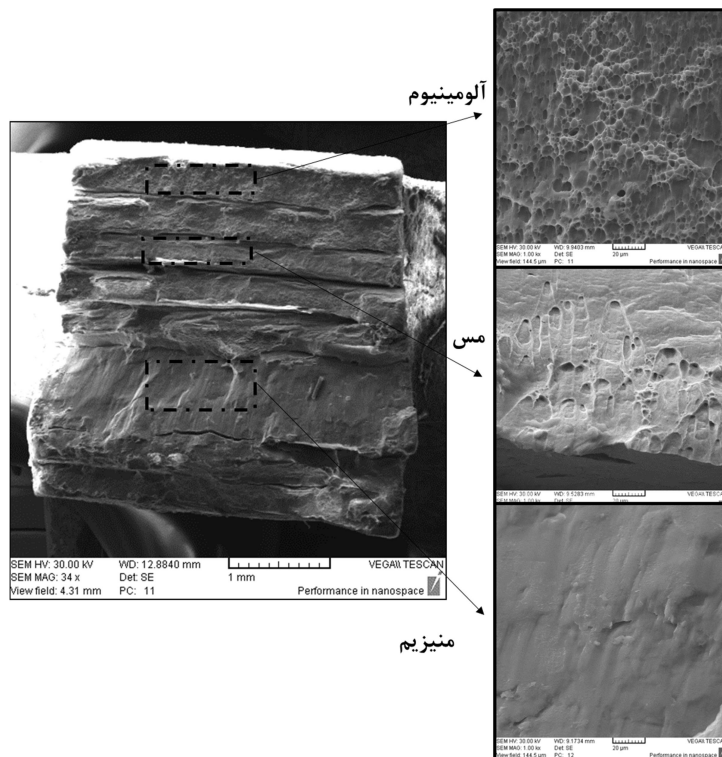
به منظور بررسی خواص مکانیکی، علاوه بر آزمون کشش تک-محوره، آزمون میکروسختی نیز برای هر کدام از لایه‌های آلومینیوم، مس و منیزیم موجود در کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-مس-منیزیم تولید شده با روش پیوند سرد نوردی به صورت مجزا انجام شده و با مقادیر اولیه میکروسختی برای هر نمونه مقایسه شد. نتایج میکروسختی ویکرز برای هر نمونه قبل و بعد از فرآیند پیوند سرد نوردی در "جدول ۲" ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نشان می‌دهد که مقدار میکروسختی برای هر سه لایه با شیب زیاد افزایش یافته است و به ترتیب قبل و بعد از فرآیند پیوند نوردی، برای لایه‌های آلومینیوم از ۲۵ به ۵۹، لایه‌ی مس از ۷۴ به ۱۳۶ و برای منیزیم از ۶۷/۳ به ۹۴/۶ می‌رسد. از علل اصلی افزایش میکروسختی برای لایه‌های مختلف، می‌توان به کارسرد، اعمال کرنش زیاد و افزایش چگالی نابه‌جایی اشاره کرد که در کارهای مشابه قبلی نیز ذکر شده‌اند و از عوامل مؤثر در

<sup>1</sup> Optic Microscopy (OM)

<sup>2</sup> Transmission Electron Microscopy (TEM)

<sup>3</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

<sup>4</sup> Stacking Faults Energy (SFE)



شکل ۶- سطح مقطع شکست کامپوزیت آلومینیوم/مس/منیزیم فرآوری شده با استفاده از پیوند سرد نوردی

جدول ۲- تغییرات خواص مکانیکی قبل و بعد از فرآیند پیوند نوردی

ماده	استحکام کششی (مگاپاسگال)	ازدیاد طول (%)	میکروسختی قبل از فرآیند پیوند نوردی (ویکرز)	میکروسختی بعد از فرآیند پیوند نوردی (ویکرز)
آلومینیوم ۱۰۵۰	۹۰.۵	۳۵.۶	۲۵±۳/۸	۷۶±۴/۵
مس خالص	۱۷۱.۵	۳۴.۴	۷۴±۳/۳	۱۳۶±۲/۹
منیزیم AZ31B	۱۷۰.۳۵	۱۸.۴	۶۷/۳±۱/۲	۹۴/۶±۲/۷
آلومینیوم-منیزیم-مس تولید شده با روش پیوند نوردی	۲۲۰.۳	۹.۳	-	-

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/منیزیم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی ساخته شد و سپس خواص مکانیکی، میکروساختاری و سطح مقطع شکست با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوره، میکروسختی ویکرز، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد: کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-مس-منیزیم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی با اعمال کاهش ضخامت ۶۰٪ با موفقیت تولید شد. همچنین با توجه به تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و پیوند مناسب بین لایه‌ها ایجاد شد.

خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده به مراتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده می‌باشد، به طوری که مقادیر استحکام کششی و میکروسختی ویکرز افزایش یافت و استحکام کششی ۲۲۰/۳ مگاپاسکال حاصل شد و البته مقدار ازدیاد طول کاهش یافته است.

#### ۵- مراجع

- [1] Alizadeh M. and Samiei M., Fabrication of nanostructured Al/Cu/Mn metallic multilayer composites by accumulative roll bonding process and investigation of their mechanical properties, *Materials & Design*, Vol. 56, pp. 680-684, 4//, 2014 .

- [25] Abbasi M. and Toroghinejad M. R., Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 3, pp. 560-563, 2010 .
- [26] Jamaati R. and Toroghinejad M. R., Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2320-2326, 2010 .
- [27] Danesh Manesh H and Karimi Taheri A., The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet, *Materials & design*, Vol. 24, No. 8, pp. 617-622, 2003 .
- [28] Movahedi M., Madaah-Hosseini H. and Kokabi A., The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 487, No. 1, pp. 417-423, 2008 .
- [29] K. J. B. McEwan, D. Milner, Pressure welding of dissimilar metals, *BRITISH WELDING JOUR*, Vol. 9, pp. 406-420, 1962 .
- [30] Butlin I. and Mackay C., Experiments on the Roll-Uinding of Tin Coatings to Non-Ferrous Substrates, *Sheet Metal Ind.*, Vol. 56, No. 11, pp. 1063-1064, 1979 .
- [31] Lu C., Tieu K. and Wexler D., Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO<sub>2</sub> particles, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 10, pp. 4830-4834, 2009 .
- [32] Alizadeh M. and Paydar M., Study on the effect of presence of TiH<sub>2</sub> particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-86, 2009 .
- [33] Tsuji N., Saito Y., Utsunomiya H. and Tanigawa S., Ultrafine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 795-800, 3/5/, 1999 .
- [34] Shaarba M. and Toroghinejad M. R., Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1, pp. 28-33, 2008 .
- [35] Yang D., Cizek P., Hodgson P. and Wen C., Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding, *Scripta materialia*, Vol. 62, No. 5, pp. 321-324, 2010 .
- [36] Wu K., Chang H., Maawad E., Gan W., Brokmeier, M. and Zheng H., Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 13, pp. 3073-3078, 2010 .
- [37] Shabani A., Toroghinejad M. R. and Shafyei A., 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, pp. 386-393, 12/15/, 2012 .
- [38] Jamaati R. and Toroghinejad M. R., Cold roll bonding bond strengths: review, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011 .
- [39] Reihanian M. and Naseri M., An analytical approach for necking and fracture of hard layer during accumulative roll bonding (ARB) of metallic multilayer, *Materials & Design*, Vol. 89, pp. 1213-1222, 1/5/, 2016 .
- [40] Rahmatbadi D. and Hashemi R., Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016 .
- [41] Rahmatbadi D., Tayyebi M. and Hashemi R., Investigation of mechanical properties, fracturgraphi and microstructure of layered Al/Cu composite produced by cold roll bonding, *journal of science and technology of composites*, 2017 .
- [2] Eizadjou M., Talachi A. K., Danesh Manesh H., Shahabi H. S. and Janghorban K., Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2. 2003-2008, 2009 .
- [3] Tayyebi M. and Eghbali B., Study on the microstructure and mechanical properties of multilayer Cu/Ni composite processed by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 759-764, 1/1/, 2013 .
- [4] Mehr V. Y., Rezaeian A. and Toroghinejad M. R., Application of accumulative roll bonding and anodizing process to produce Al-Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite, *Materials & Design*, Vol. 70, pp. 53-59, 2015 .
- [5] Li L., Nagai K. and Yin F., Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2016 .
- [6] Bay N., COLD WELDING. PART 2: PROCESS VARIANTS AND APPLICATIONS, 1986 .
- [7] Milner D. and Vaidyarth L., Significance of surface preparation in cold pressure welding, *MET CONSTR BR WELD J*, Vol. 7, pp. 1-6, 1960 .
- [8] Clemensen C., Juelstorp O. and N. Bay, Cold welding. Part 3: influence of surface preparation on bond strength, 1986 .
- [9] Vaidyarth L., Nicholas M. and Milner D., Pressure welding by rolling Brit, *Welding J*, Vol. 6, pp. 13-28, 1959 .
- [10] Wright P., Snow D. and Tay C., Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling, *Metals Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 24-31, 1978 .
- [11] Yong J., Dashu P., Dong L. and Luoxing L., Analysis of clad sheet bonding by cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 32-37, 2000 .
- [12] Yahiro A., Masui T., Yoshida T. and Doi D., Development of Nonferrous Clad Plate and Sheet by Warm Rolling with Different Temperature of Materials, *ISIJ international*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-654, 1991 .
- [13] Madaah-Hosseini H. and Kokabi A., Cold roll bonding of 5754-aluminum strips, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002 .
- [14] Pan D., Gao K. and Yu J., Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips, *Materials science and technology*, Vol. 5, No. 9, pp. 934-939, 1989 .
- [15] Danesh Manesh H. and Karimi Taheri A., Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip, *Materials science and technology*, Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, 2004 .
- [16] Eizadjou M., Danesh Manesh H. and Janghorban K., Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008 .
- [17] Le H., Sutcliffe M., Wang P. and Burstein G., Surface oxide fracture in cold aluminium rolling, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 4, pp. 911-920, 2004 .
- [18] Jamaati R. and Toroghinejad M. R., Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 3 ,No. 9, pp. 4508-4513, 2010 .
- [19] Lukaschkin N., Borissow A. and Erlikh A., The system analysis of metal forming technique in welding processes, *Journal of materials processing technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 264-269, 1997 .
- [20] Wu H., Lee S. and Wang J., Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, No. 1, pp. 173-179, 1998 .
- [21] Karakazov N., Diffusion bonding of metals, Pergamon Press Oxford, 1985 .
- [22] Luo J. and Acoff L., Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 379, No. 1, pp. 164-172, 2004 .
- [23] Barlow C., Nielsen P. and Hansen N., Multilayer roll bonded aluminium foil: processing, microstructure and flow stress, *Acta materialia*, Vol. 52, No. 13, pp. 3967-3972, 2004 .
- [24] Quadir M., Wolz A., Hoffman M. and Ferry M., Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminium strip, *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 11, pp. 959-962, 2008 .