



## تولید فویل فلزی چند لایه استحکام بالا با روش نورد پیوندی تجمعی

الهه علیزاده علیسرایی<sup>1و2</sup>، رامین هاشمی<sup>3و4\*</sup>، داود رحمت آبادی<sup>1و2</sup>، کریستوف سومیش<sup>5</sup>

- 1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مرکز مطالعات و همکاری های علمی و بین المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران  
 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 4- دانشیار، مهندسی مکانیک، مرکز مطالعات و همکاری های علمی و بین المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران  
 5- استاد، انستیتو علم مواد، اتصال دهی و شکل دهی، دانشگاه صنعتی گراتس، گراتس  
 \* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله:

دریافت: 99/04/13

پذیرش: 99/10/03

## کلیدواژگان

فویل آلومینیوم  
 نورد تجمعی  
 خواص مکانیکی  
 شکست نگاری  
 مطالعه تجربی  
 مواد ریزدانه

فویل آلومینیوم به طور گسترده‌ای در بسته‌بندی و مصارف خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا از مواد غذایی و محصولات دارویی در برابر اثرات محیطی محافظت کند. در سال‌های اخیر، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، به سبب تولید مواد فلزی با ساختار فوق ریزدانه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. گستره‌ی بالای کاربرد نانو ساختارها، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی منحصر به فردشان، اهمیت مطالعه بر روی این روش‌های شکل‌دهی را آشکار می‌سازد. فرآیند نورد پیوندی تجمعی یکی از بهترین و کاربردی‌ترین روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که مکانیزم آن، تغییر شکل پلاستیک ماده از طریق عبور بین دو یا چند غلتک است. در پژوهش حاضر، فویل‌های آلومینیومی به ضخامت 200 میکرون به روش نورد تجمعی در 5 گذر، بدون استفاده از روانکار، بدون عملیات حرارتی بین گذرها و در دمای محیط تولید شدند. به منظور بررسی خواص مکانیکی آزمون کشش تک محوره و میکروسختی، و برای بررسی سطح مقطع شکست، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. استحکام کششی نهایی در پایان گذر پنجم نورد تجمعی به 393 مگاپاسکال رسید که نسبت به نمونه ی اولیه 5.9 برابر شده است. همچنین نسبت به پژوهش پیشین، استحکام بدست آمده بالاترین مقدار بوده که به دلیل ضخامت کمتر لایه‌ها و نفوذ اکسیدهای سطحی به نمونه در مرحله آماده‌سازی است. همچنین با افزایش گذرهای نورد پیوندی تجمعی، ضخامت لایه‌ها کمتر شده و کیفیت پیوند بین لایه‌ها بهبود می‌یابد. بررسی سطوح شکست در گذر پنجم نشان می‌دهد که مکانیزم شکست از نوع نرم است.

## Production of high strength metallic foil by accumulative roll bonding process

Elaheh Alizadeh Alisaraei<sup>1,2</sup>, Ramin Hashemi<sup>1,2,\*</sup>, Davood Rahmatabadi<sup>1,2</sup>, Christof Sommitsch<sup>3</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Center for International Scientific Studies & Collaboration (CISSC), Ministry of Science Research and Technology, Tehran, Iran

3- Institute of Materials Science, Graz University of Technology, Graz, Austria

\* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir.

## Keywords

Aluminum Foil  
 Accumulative Roll Bonding  
 Mechanical Properties  
 Fractography  
 Experimental Study  
 Ultrafine-Grained Materials

## Abstract

Aluminum foils have been extensively used in packaging and household applications to protect foods and pharmaceutical products from environmental effects. In recent years, severe plastic deformation processes have been highly regarded due to the production of ultra-fine-grained metal materials. The high applicability of nanostructures, due to their unique physical and mechanical properties, reveals the importance of investigations on new forming methods. Accumulative roll bonding (ARB) process is one of the best and most practical methods for forming metal sheets, which mechanism is the plastic deformation of material through the passage between two or more rollers. In this investigation, thin aluminum foils with a thickness of two hundred microns were produced using accumulative roll bonding method in five passes without lubricant or additional heat treatment between passes and at ambient temperature. To investigate the mechanical properties, uniaxial tensile test and microhardness test were used, and to investigate the microstructure and fracture surface area, scanning electron microscopy was used. The ultimate tensile strength at the end of the fifth ARB pass reached 393 MPa, about 5.9 times larger than of the initial sample. Also, compared to the previous research, the obtained strength was highest due to the lower thickness of the layers and the penetration of surface oxides into the metal matrix during preparation. Furthermore, by increasing the number of accumulative roll bonding passes, the thickness of the layers decreases and the bonding quality between layers is improved. Investigation on tensile fracture surface after five passes exhibits ductile failure mechanism.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Alizadeh Alisaraei, E. Hashemi, R. Rahmatabadi, D. and Sommitsch, Ch, "Production of high strength metallic foil by accumulative roll bonding process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1076-1082, 2020.

## 1- مقدمه

در سال‌های اخیر، بررسی‌های فراوانی پیرامون کاهش وزن سازه‌ها برای جایگزینی قطعات فولادی سنگین، با ساختارهای آلومینیومی و کامپوزیتی زمینه فلزی با دانه‌بندی فوق‌ریزدانه صورت گرفته است. از جمله خواص بی‌نظیر این دسته مواد می‌توان به استحکام زیاد در دمای محیط، خاصیت سوپر پلاستیک در دماهای بالا، و مقاومت خوب در برابر خوردگی اشاره کرد. آلومینیوم به‌عنوان پرکارترین فلز بعد از فولاد و ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای که دارد، بیشترین تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌های فلزی و فلزات فوق‌ریزدانه، در سالیان اخیر را به خود اختصاص داده است. شهرت اصلی این فلز، به‌خاطر دو ویژگی سبکی و مقاومت در برابر خوردگی است [1]. از جمله خواص دیگر آلومینیوم می‌توان به نسبت استحکام به وزن بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی زیاد، قابلیت شکل‌پذیری بالا، استحکام بالا در درجه حرارت‌های کم و غیره اشاره کرد [2]. اگرچه استحکام قابل حصول آلیاژهای آلومینیوم در بیشتر موارد کمتر از آلیاژهای فولادی است، ولی به دلیل نسبت استحکام به وزن بالای آن، آلیاژهای آلومینیوم کاربردهای فراوانی در مصارف صنعتی پیدا کرده‌اند [3]. به طور کلی، کاربرد فویل‌های آلومینیوم بسیار گسترده است از قبیل: عایق‌های حرارتی، کوپل‌های الکتریکی، خازن‌ها، ترانسفورماتورها، فویل‌های کابلی، ظروف نیمه سخت، کلاه‌ها، کیسه‌ها، بسته‌بندی‌ها، درپوش‌ها، صفحه‌های لیتوگرافی، محصولات تزئینی و غیره. البته کاربرد فویل‌های آلومینیومی عموماً در سه دسته اصلی بسته‌بندی، ساختمان و الکتریکی قرار می‌گیرد. آلومینیوم علاوه بر قابل‌باز یافت بودن، به سبب ویژگی‌هایی از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت عالی در برابر اثرات محیطی و عوامل خوردنده‌ی شیمیایی، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، و همچنین بی‌جرقه و غیرسمی بودن در مصارف صنعتی ترجیح داده می‌شود. فویل آلومینیوم از گروه اول، یک مانع کامل برای نور، اکسیژن، رطوبت و باکتری است. به همین دلیل در بسته‌بندی مواد غذایی و دارویی کاربرد گسترده‌ای دارد. همچنین برای بسته‌بندی کالاهای فاسد شدنی بدون نیاز به یخچال استفاده می‌شود [4].

یکی از روش‌های تولید فلزات و آلیاژهای با ساختار فوق‌ریزدانه، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشند، که مکانیزم عملکرد تمامی آن‌ها، اعمال فشار زیاد و تنش برشی بالا به بلورهای داخلی ماده و کاهش اندازه دانه تا ابعاد نانومتری، بدون تغییر در هندسه است [5, 6]. فرآیند نورد تجمعی یکی از بهترین و کاربردی‌ترین روش‌های تغییر شکل فلزات است که به وسیله عبور دادن نمونه از بین دو یا چند غلتک و تکرار این مراحل با اعمال کرنش بالا است [7, 8]. در زمینه‌ی فرآیند نورد تجمعی، علاوه بر ساخت نمونه، بخش اعظم کارهای انجام شده در زمینه‌ی بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری می‌باشد [9-12]. اولین مقاله‌ی فرآیند نورد تجمعی در سال 1998 توسط سایتو و همکاران چاپ شد [13]. لی و همکاران [14]، تاثیر فرآیند نورد تجمعی بر بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با اعمال هشت پاس فرآیند نورد تجمعی بر روی آلیاژ آلومینیوم در دمای محیط، قطر دانه‌های آلومینیوم از یک میکرومتر به کمتر از 340 نانومتر رسید. همچنین نتایج آزمون کشش آن‌ها نشان داد که استحکام به شدت افزایش یافته است. در پژوهشی دیگر، هوآنگ و همکاران [15]، ریزساختار ورق آلومینیوم خالص تجاری تحت فرآیند نورد تجمعی در دمای بالا را مورد بررسی قرار دادند. رحمت‌آبادی و همکاران [11]، چقرمگی شکست، شکل‌پذیری و خواص الاستیک و پلاستیک،

بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که علی‌رغم کاهش شدید ازدیاد طول در فرآیند نورد تجمعی، مقدار چقرمگی شکست با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد تجمعی بهبود یافته است و بهترین خواص مکانیکی و چقرمگی شکست در پاس پایانی به‌دست آمده است. همچنین بررسی آن‌ها نشان داد که خواص الاستیک نیز همانند خواص پلاستیک در طی اعمال فرآیند نورد تجمعی با نرخ بسیار کم بهبود یافته است. به طور کلی در فرآیند نورد تجمعی، اعمال کرنش بالا و انجام کار سرد، باعث بهبود خواص مکانیکی و ریزدانه شدن ساختار می‌شود و در مقابل شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. این روند تغییرات در خواص مکانیکی اکثر نمونه‌ها و کامپوزیت‌های تولید شده با فرآیند نورد تجمعی مشاهده شده است [16].

## 2- روش تحقیق

آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق، آلومینیوم خالص تجاری از گروه اول 1050 (99.44% Al, 0.406% Fe, 0.121% Si, 0.033% Cu) می‌باشد. فویل اولیه‌ی آلومینیوم به ضخامت 200 میکرون، در ابعاد 300 در 80 میلی‌متر برش داده شد. در شکل 1 طرح شماتیک فرآیند نورد تجمعی مشاهده می‌شود. اولین مرحله در فرآیند نورد تجمعی، مرحله‌ی آماده‌سازی سطح دو ورق می‌باشد که برای دستیابی به یک اتصال نوردی کامل بین دو ورق، ضروری است. قطعات آماده شده در ابعاد یکسان با استون خالص تمیز شده و در دمای اتاق خشک گردید. این کار به منظور پاک شدن چربی‌های سطح قطعه و ایجاد پیوند بهتر انجام می‌گیرد. در مرحله‌ی بعد، سطوح آماده شده‌ی دو ورق روی هم قرار گرفتند و برای جلوگیری از لغزش ورق‌ها بر روی هم تحت فشار زیاد غلطک در حین فرآیند، چهار گوشه‌ی آن با سیم مسی محکم بسته شدند. سپس در دمای محیط و بدون استفاده از روانکار، بدون فوت وقت، از بین غلتک‌ها عبور داده شدند تا از اکسید شدن سطح جلوگیری شده و پیوند مستحکم‌تر گردد. استفاده از نورد در فرآیند نورد تجمعی نه تنها به عنوان یک روش تغییر شکل، بلکه به‌عنوان عاملی برای ایجاد اتصال بین دو ورق و تولید یک ورق کاملاً یکپارچه کاربرد دارد. میزان کاهش ضخامت اعمال شده در هر مرحله 50 درصد است که در نتیجه‌ی آن، ورق بدست آمده ضخامتی برابر ضخامت ورق اولیه داشت. سپس این ورق از جهت طولی به دو قسمت بریده شد و مراحل کار دوباره تکرار گردید. بدین ترتیب نمونه‌های نازک آلومینیومی تا 5 مرحله نورد تولید شدند.

یکی از روش‌های تولید فلزات و آلیاژهای با ساختار فوق‌ریزدانه، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشند، که مکانیزم عملکرد تمامی آن‌ها، اعمال فشار زیاد و تنش برشی بالا به بلورهای داخلی ماده و کاهش اندازه دانه تا ابعاد نانومتری، بدون تغییر در هندسه است [5, 6]. فرآیند نورد تجمعی یکی از بهترین و کاربردی‌ترین روش‌های تغییر شکل فلزات است که به وسیله عبور دادن نمونه از بین دو یا چند غلتک و تکرار این مراحل با اعمال کرنش بالا است [7, 8]. در زمینه‌ی فرآیند نورد تجمعی، علاوه بر ساخت نمونه، بخش اعظم کارهای انجام شده در زمینه‌ی بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری می‌باشد [9-12]. اولین مقاله‌ی فرآیند نورد تجمعی در سال 1998 توسط سایتو و همکاران چاپ شد [13]. لی و همکاران [14]، تاثیر فرآیند نورد تجمعی بر بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با اعمال هشت پاس فرآیند نورد تجمعی بر روی آلیاژ آلومینیوم در دمای محیط، قطر دانه‌های آلومینیوم از یک میکرومتر به کمتر از 340 نانومتر رسید. همچنین نتایج آزمون کشش آن‌ها نشان داد که استحکام به شدت افزایش یافته است. در پژوهشی دیگر، هوآنگ و همکاران [15]، ریزساختار ورق آلومینیوم خالص تجاری تحت فرآیند نورد تجمعی در دمای بالا را مورد بررسی قرار دادند. رحمت‌آبادی و همکاران [11]، چقرمگی شکست، شکل‌پذیری و خواص الاستیک و پلاستیک،



Fig. 3 Image of uniaxial tensile test of aluminum foil

شکل 3 تصویری از آزمون کشش تک محور فویل آلومینیوم

### 3-2- شکست نگاری

سطح مقطع شکست نمونه‌های تست کشش تک محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین مود شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>1</sup>، مدل VEGA TESCAN مورد بررسی قرار گرفت.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- شکست نگاری

مکانیزم غالب شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار هستند، تشکیل حفره و سپس شکست نرم است. این نوع شکست با تشکیل میکروحفره‌ها، پیوستگی، انتشار ترک و سپس شکست برشی در زاویه‌ای نسبتاً در راستای جهت کشش رخ می‌دهد [21]. در شکل 4 مقطع شکست نمونه‌ی اولیه آورده شده است. وجود دیمپل‌های عمیق و یکسان، حاکی از وقوع شکست نرم معمول در آلومینیوم اولیه است. معمولاً این نوع شکست در بیشتر فلزات، ظاهر فیبر گونه‌ی خاکستری با دیمپل‌های کروی دارد [22, 23].

شکل 5 سطح مقطع شکست فویل‌های آلومینیومی تولید شده در گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی را نشان می‌دهد. واضح است که ساختار لایه‌ای در پاس اول مشاهده است و با افزایش کرنش اعمالی، حالت لایه‌ای کمتر نمایان می‌شود که بیانگر افزایش بهبود کیفیت پیوند بین لایه‌ها با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد تجمعی است. همچنین در همه نمونه‌ها مکانیزم شکست نرم حاکم است و با اعمال کرنش، دیمپل‌ها و میکروحفرات در جهات مختلف کشیده شده‌اند که دلیل آن اعمال کرنش‌های غیریکنواخت در جهات مختلف است. علاوه بر این، با افزایش کرنش اعمالی، تعداد و عمق میکروحفرات کاهش یافته است که نشان‌دهنده شکست نرم برشی است.

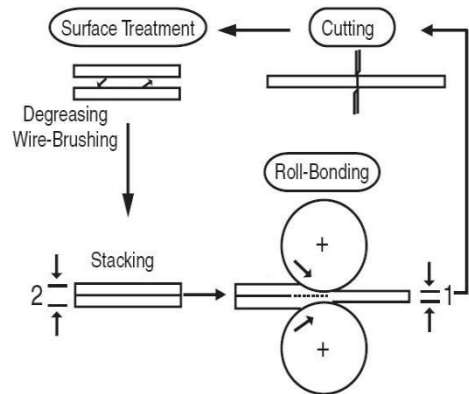


Fig. 1 Schematic illustration of ARB process [19]

شکل 1 شماتیک فرآیند نورد تجمعی [19]

#### 2-1- آزمون کشش تک محوره

برای بررسی تأثیر فرآیند نورد تجمعی بر خواص مکانیکی فویل‌های نازک آلومینیومی، آزمون کشش تک محوره انجام شد. برای هر مرحله نورد، دو نمونه‌ی آزمون کشش در جهت نورد، به وسیله‌ی ماشین‌های وایرکات و مطابق با استاندارد ASTM E8-13a که در تصویر 2 آمده است، آماده شد [20]. آزمون کشش در دمای اتاق و بدون استفاده از روانکار و با سرعت 0.5 میلی-متر بر دقیقه، با استفاده از دستگاه سنتام انجام شد. مقدار ازدیاد طول نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری طول گیج، قبل و بعد از تست کشش تعیین شد. تصویر 3 نمایی از آزمون کشش تک محوره را نشان می‌دهد.

با انجام آزمون کشش، منحنی تنش-کرنش برای هر نمونه بدست آمد و با استفاده از این منحنی‌ها خواص مکانیکی شامل استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییر طول تا شکست (چکش‌خواری) برای هر مرحله نورد محاسبه شد و با نتایج به‌دست‌آمده از نمونه‌ی خام اولیه مقایسه گردید.

#### 2-2- آزمون میکروسختی و بکرز

آزمون سختی سنجی و بکرز جهت تعیین میکروسختی نمونه‌ها، طبق استاندارد ASTM E92 تحت بار 50 گرم و زمان اعمال بار 15 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه‌ی ضخامت و طول) اندازه‌گیری شد. پیش از انجام آزمون میکروسختی، نمونه‌ها توسط مانت سرد و سنباده‌ی 200 تا 2000 آماده شدند. میکروسختی برای هر نمونه، در بیش از پنج نقطه‌ی مختلف و به صورت تصادفی اندازه‌گیری شد و با میانگین گرفتن از مقادیر تعیین شد.

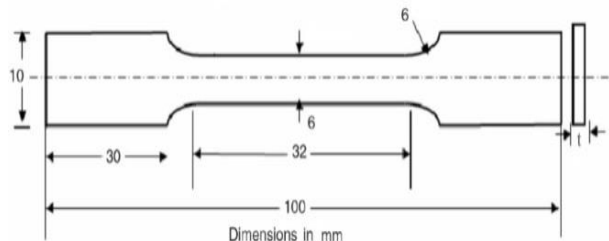


Fig. 2 Schematic of uniaxial tensile test specimen with the thickness of 200 micrometer

شکل 2 طرح نمونه‌ی آزمون کشش تک محوره برای فویل با ضخامت 200 میکرومتر

<sup>1</sup> SEM (Scanning Electron Microscope)

نسبت به ابتدا، افزایش می‌یابد و مقدار ازدیاد طول نیز، با نرخ کمی افزایش می‌یابد که اصلاح دانه‌بندی و کاهش تاثیر کارسختی از عوامل اصلی این تغییرات می‌باشد. پس می‌توان گفت که افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی ناشی از دو مکانیزم کرنش سختی و اصلاح ریزساختار می‌باشد، که در گذرهای ابتدایی فرآیند، مکانیزم کرنش سختی و در پاس‌های بعدی مکانیزم تقویت مرز دانه‌ها نقش غالب را ایفا می‌کند. بیشترین مقدار استحکام کششی نهایی در گذر پنجم معادل 393 مگاپاسکال می‌باشد که با افزایش چشمگیر نسبت به نمونه‌ی اولیه، بیش از 5.9 برابر شده است. افزایش قابل توجه استحکام نسبت به نمونه‌های آلومینیوم دیگر، به دلیل نفوذ لایه‌های اکسیدی در فصل مشترک‌ها است. همچنین به دلیل ضخامت و استحکام کمتر لایه‌ها، شکست لایه‌ها و نفوذ راحت‌تر اتفاق می‌افتد و این عامل علاوه بر بهبود پیوند لایه‌ها باعث افزایش بیشتر استحکام می‌شود [5, 25]. مقدار ازدیاد طول نمونه نیز در گذر پنجم به 5.5% میرسد که نسبت به مقدار ازدیاد طول در گذر اول 1.7 برابر شده است. کاهش شدید درصد کشیدگی، ناشی از افزایش زیاد تراکم نابه‌جایی‌ها و تجمع فشارهای داخلی است که باعث تقویت هسته‌ی ترک‌ها می‌شود. این روند درصد کشیدگی در مراحل اولیه‌ی هر فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید مشاهده می‌شود [26].

همچنین، در شکل 8 تغییرات میکروسختی ویکرز نمونه‌های فویل آلومینیومی نورد تجمعی شده در گذرهای مختلف نشان داده شده است. مطابق نمودار، تا پایان گذر چهارم فرآیند نورد تجمعی، مقدار میکروسختی با افزایش تعداد گذرهای فرآیند، با شیب نسبتاً یکسانی افزایش می‌یابد. این روند در گذر پنجم فرآیند، کاهشی است که علت اصلی آن، اشباع شدن چگالی نابه‌جایی و از بین رفتن اثر کرنش سختی می‌باشد [27]. با افزایش تعداد گذرهای فرآیند، اثر کارسختی کاهش و نقش ریز شدن دانه‌ها پررنگ‌تر می‌شود. بیشترین مقدار میکروسختی در گذر چهارم معادل 81 ویکرز می‌باشد که نسبت به نمونه‌ی اولیه، به بیش از 2 برابر افزایش یافته است [13, 28, 29].

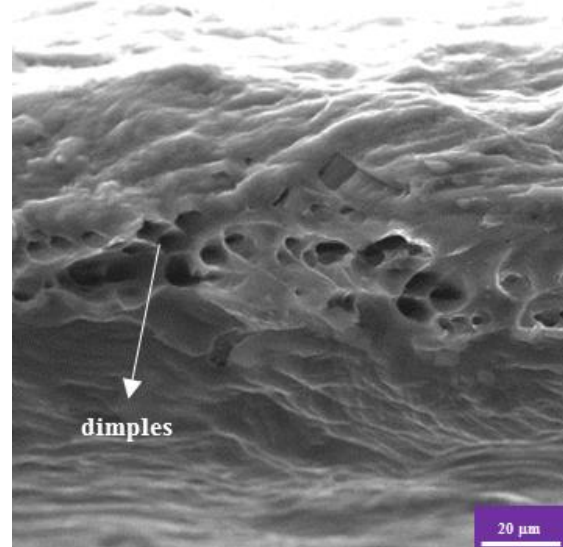


Fig. 4 Tensile fracture surface of initial sample

شکل 4 سطح مقطع شکست نمونه‌ی اولیه

### 3-2- خواص مکانیکی

در شکل‌های 6 و 7 نمودار تنش-کرنش مهندسی و نمودار تغییرات استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول برحسب تعداد گذرهای فرآیند نورد تجمعی مشاهده می‌شود. مطابق نمودار، با افزایش تعداد گذرهای فرآیند، استحکام کششی افزایش می‌یابد. تغییرات استحکام کششی در فلزاتی که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرند، ناشی از دو عامل مهم و اصلی کارسختی به وسیله‌ی نابه‌جایی‌ها و ریز شدن دانه‌ها می‌باشد [24]. پس از گذر اول فرآیند نورد تجمعی، استحکام نمونه و ازدیاد طول به ترتیب شدیداً افزایش و کاهش می‌یابد، که عامل اصلی آن، افزایش چگالی نابه‌جایی ناشی از کرنش سختی و کار سرد می‌باشد، که این مکانیزم در گذرهای ابتدایی فرآیند غالب می‌باشد. در گذرهای بعدی، استحکام کششی با شیب کمتری

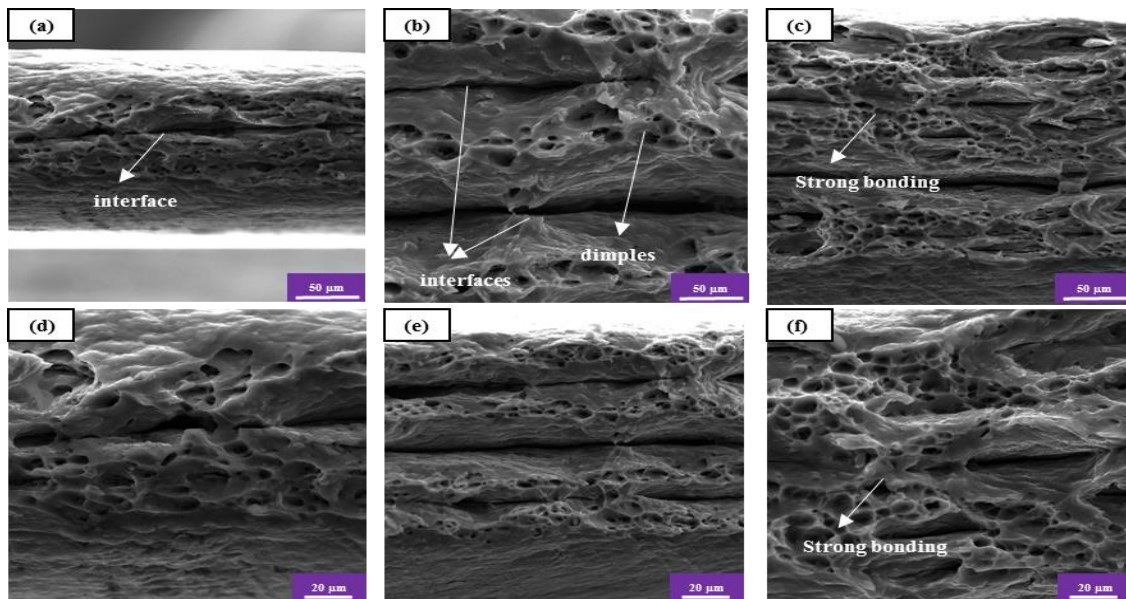


Fig. 5 Tensile fracture surface of rolled aluminum foils at two different magnification scales (a, d) first pass, (b, e) third pass, (c, f) fifth pass

شکل 5 سطح مقطع شکست فویل‌های آلومینیومی نورد شده در دو مقیاس بزرگنمایی مختلف (a, d) گذر اول، (b, e) گذر سوم، (c, f) گذر پنجم

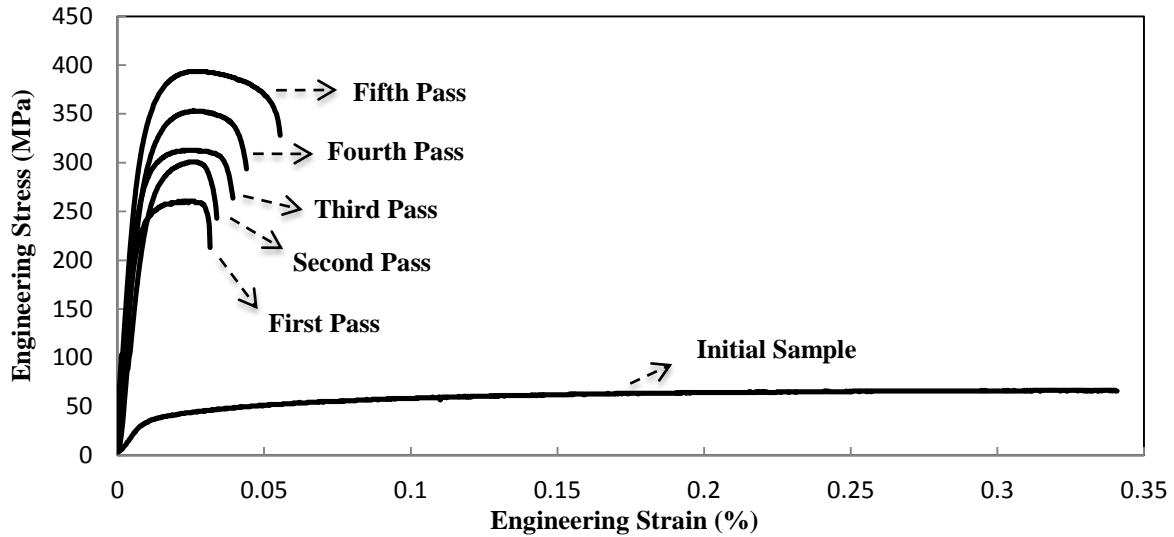


Fig. 6 Engineering stress-strain curves of initial sample and aluminum foils at different ARB passes

شکل 6 منحنی تنش- کرنش نمونه‌های آلومینیومی در گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی

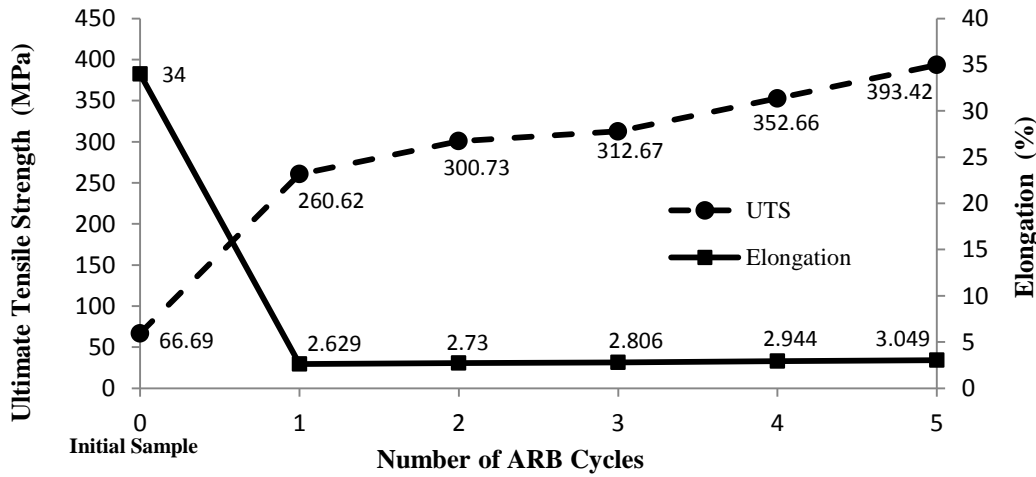


Fig. 7 Variation of ultimate tensile strength and elongation for initial sample and aluminum foils after different ARB passes

شکل 7 تغییرات استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول نمونه‌های آلومینیومی در گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی

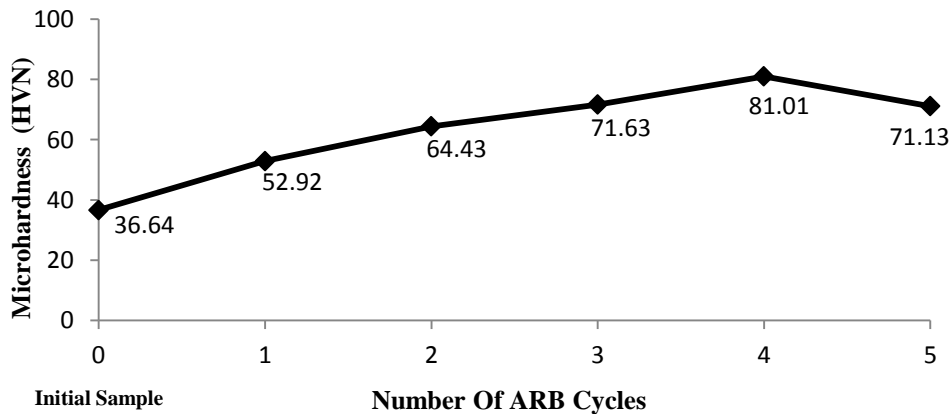


Fig. 8 Variation of microhardness for initial state and after different ARB passes of aluminum foils

شکل 8 تغییرات میکروسختی نمونه‌های آلومینیومی در گذرهای مختلف فرآیند نورد تجمعی

## 4- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، فویل‌های آلومینیومی نازک از گروه 1000 به ضخامت 0.2 میلی‌متر، در دمای اتاق و بدون استفاده از روانکار، تا 5 مرحله به روش نورد تجمعی تولید گردید. در ادامه، خواص مکانیکی و سطح شکست ورق‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش بطور خلاصه به شرح زیر است:

- با افزایش تعداد گذر فرآیند نورد تجمعی، کیفیت پیوند بین لایه‌ها بهبود یافته و خاصیت لایه‌ای کاهش یافت و در پایان پاس پنجم تقریباً حالت لایه‌ای حذف شد.
- با افزایش تعداد گذر فرآیند نورد تجمعی، استحکام کششی افزایش می‌یابد، که مقدار این جهش در گذر اول بسیار چشم‌گیر و با افزایش کرنش اعمالی از نرخ افزایش آن کاسته می‌شود. افزایش خواص مکانیکی و کاهش ازدیاد طول در فرآیند نورد تجمعی به دو عامل کارسختی و تغییرات ریزساختاری در نمونه‌ها بستگی دارد.
- ازدیاد طول نمونه در گذر اول کاهش چشم‌گیری دارد، اما در ادامه، با افزایش تعداد گذرهای نورد تجمعی، با شیب کمی افزایش می‌یابد.
- تا پایان گذر چهارم فرآیند نورد تجمعی، مقدار میکروسختی نمونه‌ها، افزایش می‌یابد. این روند در مرحله‌ی پنجم به دلیل اشباع چگالی ناهنجاری‌ها معکوس شده و با کاهش میزان سختی نمونه همراه است.
- مقدار استحکام و سختی بدست آمده در این تحقیق، نسبت به نمونه‌های آلومینیومی تولید شده به روش نورد تجمعی در منابع دیگر، بسیار بیشتر بوده است که به دو عامل ضخامت کمتر لایه‌ها و نفوذ اکسیدهای سطحی بیشتر به مرکز نمونه‌ها و پخش شدن آن در پاس‌های بعدی است.

## - تقدیر و تشکر

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

## 5- مراجع

- Ultrafine-Grained Al 1050 Strips Fabricated Via Accumulative Roll Bonding Process" *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 8, pp. 086542, 2019.
- [6] Valiev, R. Z. and Langdon, T. G., "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement" *Progress in Materials Science*, Vol. 51, No. 7, pp. 881-981, 2006.
- [7] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Hashemi, R. and Faraji, G., "Microstructure and Mechanical Properties of Al/Cu/Mg Laminated Composite Sheets Produced by the Arb Process" *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 564-572, 2018.
- [8] Ouyang, J., Yarrapareddy, E., Kovacevic, R., "Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, pp. 110-122, 2006.
- [9] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Sheikhi, A. and Hashemi, R., "Fracture Toughness Investigation of Al1050/Cu/Mg3Zn Multi-Layered Composite Produced by Accumulative Roll Bonding Process" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 734, pp. 427-436, 2018.
- [10] Rahmatabadi, D., Mohammadi, B., Hashemi, R. and Shojaei, T., "An Experimental Study of Fracture Toughness for Nano/Ultrafine Grained Al5052/Cu Multilayered Composite Processed by Accumulative Roll Bonding" *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 140, No. 10, 2018.
- [11] Rahmatabadi, 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.
- [12] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Hashemi, R. and Faraji, G., "Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Multilayer Al5052-Cu Composite Produced by Accumulative Roll Bonding" *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 57, No. 3-4, pp. 144-153, 2018.
- [13] Saito, Y., "Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" *Scripta Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- [14] Lee, S., Saito, Y., Sakai, T. and Utsunomiya, H., "Microstructures and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Processed by Accumulative Roll-Bonding" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 325, No. 1-2, pp. 228-235, 2002.
- [15] Huang, X., Tsuji, N., Hansen, N. and Minamino, Y., "Microstructural Evolution During Accumulative Roll-Bonding of Commercial Purity Aluminum" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 340, No. 1-2, pp. 265-271, 2003.
- [16] Park, K.-T., Kwon, H.-J., Kim, W.-J. and Kim, Y.-S., "Microstructural Characteristics and Thermal Stability of Ultrafine Grained 6061 Al Alloy Fabricated by Accumulative Roll Bonding Process" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 316, No. 1-2, pp. 145-152, 2001.
- [17] Mozaffari, A., Manesh, H. and Janghorban, K., "Evaluation of Mechanical Properties and Structure of Multilayered Al/Ni Composites Produced by Accumulative Roll Bonding (Arb) Process" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 489, No. 1, pp. 103-109, 2010.
- [18] Zhang, R. and Acoff, V. L., "Processing Sheet Materials by Accumulative Roll Bonding and Reaction Annealing from Ti/Al/Nb Elemental Foils" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 463, No. 1, pp. 67-73, 2007.
- [19] Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., Najafizadeh, A., "An alternative method of processing MMCs by CAR process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 10, pp. 2720-2724, 2010.
- [1] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Mohammadi, B. and Shojaei, T., "Experimental Evaluation of the Plane Stress Fracture Toughness for Ultra-Fine Grained Aluminum Specimens Prepared by Accumulative Roll Bonding Process" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 708, pp. 301-310, 2017.
- [2] Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T., Sazgari, B., "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 460, No. 1, pp. 535-538, 2008.
- [3] Mondolfo, L. F., "Aluminum Alloys: Structure and Properties", Elsevier, 2013.
- [4] Keles, O. and Dundar, M., "Aluminum Foil: Its Typical Quality Problems and Their Causes" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp. 125-137, 2007.
- [5] Rahmatabadi, D., Shahmirzalo, A., Hashemi, R. and Farahani, M., "Using Digital Image Correlation for Characterizing the Elastic and Plastic Parameters of

- [20] ASTM, E., "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials" Annual book of ASTM standards. ASTM, 2001.
- [21] Naseri, M., Hassani, A. and Tajally, M., "Fabrication and Characterization of Hybrid Composite Strips with Homogeneously Dispersed Ceramic Particles by Severe Plastic Deformation" *Ceramics International*, Vol. 41, No. 3, pp. 3952-3960, 2015.
- [22] Barsoum, I. and Faleskog, J., "Rupture Mechanisms in Combined Tension and Shear—Experiments" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, No. 6, pp. 1768-1786, 2007.
- [23] Ceschini, L., Minak, G. and Morri, A., "Tensile and Fatigue Properties of the Aa6061/20 Vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p and Aa7005/10 Vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p Composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 2, pp. 333-342, 2006.
- [24] Yan, H. and Lenard, J. G., "A Study of Warm and Cold Roll-Bonding of an Aluminium Alloy" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 385, No. 1-2, pp. 419-428, 2004.
- [25] Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M., Tayyebi, M. and Hashemi, R., "Characterizing the Elastic and Plastic Properties of the Multilayered Al/Brass Composite Produced by Arb Using Dic" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 753, pp. 70-78, 2019.
- [26] Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D., Micari, F., Lahoti, G., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N. and Rosochowski, A., "Severe Plastic Deformation (Spd) Processes for Metals" *CIRP Annals*, Vol. 57, No. 2, pp. 716-735, 2008.
- [27] 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, 2014.
- [28] Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T. and Hong, R., "Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" *Scripta Materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- [29] Lee, S., Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H. and Sakai, T., "Role of Shear Strain in Ultragrain Refinement by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" *Scripta Materialia*, Vol. 46, No. 4, pp. 281-285, 2002.