



## بررسی تجربی سطوح شکست و خواص مکانیکی آلومینیوم 1050 تولید شده با فرآیند نورد تجمعی

داود رحمت آبادی<sup>1</sup>، رامین هاشمی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 01 مرداد 1395  
پذیرش: 20 شهریور 1395  
ارائه در سایت: 24 مهر 1395  
کلید واژگان:

### چکیده

روش نورد تجمعی، از روش‌های جدید تغییر شکل شدید پلاستیک می باشد که در یک دهه گذشته برای تولید مواد زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی و مود شکست ورق های ریزساختار و چندلایه آلومینیوم-آلومینیوم با استفاده از روش نورد تجمعی، در عبورهای مختلف پرداخته شد. فرآیند نورد تجمعی در دمای اتاق، بدون استفاده از روان کار، در هفت گذر متوالی و بدون عملیات حرارتی بین هر عبور انجام شد که مقدار کاهش ضخامت در هر گذر 50% می باشد. خواص مکانیکی و شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمایش کشش تک محوره و آزمایش میکروسختی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش سیکل‌های نورد تجمعی استحکام کششی و سختی افزایش می‌یابد که این افزایش در سیکل‌های ابتدایی با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد. همچنین مقدار ازدیاد طول در پایان گذر اول کاهش و سپس تا پایان گذر هفتم افزایش می‌یابد. این تغییرات در خواص مکانیکی در طول فرآیند نورد تجمعی به دلیل حاکم بودن مکانیزم‌های کارسرد و کرنش سختی زیاد در سیکل‌های ابتدایی و بهبود ریزساختاری و ریزشدن دانه‌ها در سیکل‌های پایانی این فرآیند می‌باشد. بیشترین استحکام کششی و میکروسختی در پایان سیکل هفتم بدست می‌آید که نسبت به نمونه‌ی اولیه به ترتیب 241.4 و 106 درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که با افزایش سیکل‌های فرآیند، حفرات با اندازه کوچکتر و عمق کمتر نسبت به نمونه اولیه مشاهده شد و مکانیزم شکست از نرم به شکست نرم برشی تغییر می‌کند.

نورد تجمعی

ورق آلومینیوم 1050

خواص مکانیکی و شکست

میکروسکوپ الکترونی روبشی

## Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process

Davood Rahmatabadi, Ramin Hashemi\*

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

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 22 July 2016  
Accepted 10 September 2016  
Available Online 15 October 2016

### Keywords:

ARB  
1050 aluminum sheet  
mechanical properties  
fracture mode  
SEM

### ABSTRACT

Accumulative roll bonding is new method of severe plastic deformation that in the last decade, utilized to produce many materials. In present study, investigated mechanical properties and fracture mode of microstructure and multi-layered Al-Al fabricated during accumulative roll bonding process. Accumulative roll bonding process applied without using lubricant, in the ambient temperature repeated in seven cycle continuously and without heat treatment between cycles of process that the value of reduction thickness is 50% in each cycle. The evaluation of mechanical properties and fracture mode performed by uniaxial tensile test, micro hardness and scanning electron microscope (SEM) and revealed that by increasing number of ARB cycles, micro hardness and tensile strength increased that increasing rate at initial cycles more than last cycles. Also elongation after first cycle decreased and then increased. The variation for mechanical properties during ARB due to governing cold work and high strain hardening at initial cycles and improve microstructural and grain refinement at last cycles. Maximum value of tensile strength and micro hardness achieved in last cycle (seventh cycle) that compared with primary annealed sheet 241.4 and 106% increased, respectively. Also results of SEM demonstrated that by rising the number of ARB cycles, viewed dimples with shallower and smaller than the initial sample and changed fracture mechanism from ductile to shear ductile.

### 1-مقدمه

ویژگی جالب و به صورت همزمان مانند چگالی کم، خواص مکانیکی مطلوب، هدایت حرارتی خوب و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. از طرف دیگر در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه نانومتری یا بسیار ریزدانه موضوع بسیاری

در سال‌های اخیر آلیاژهای لایه‌ای بیش از گذشته در کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. آلیاژهای لایه‌ای و کامپوزیتی آلومینیوم بیشتر در صنایع اتومبیل‌سازی برای کاربردهای انتقال حرارت به دلیل داشتن چندین

عنوان مثال استفاده از فلزاتی مانند فولاد و تیتانیوم به دلیل استحکام اولیه بالا، نیازمند استفاده از تجهیزات با قیمت و توان بیشتر است. در این تحقیق، آلومینوم خالص تجاری با استحکام پایین و چقرمگی بالا با استفاده از فرآیند نورد تجمعی تولید شد. معمولاً آلومینیوم خالص به دلیل استحکام پایین در صنعت کاربرد زیادی ندارد و تنها در بسته‌بندی محصولات مختلف و آن هم به دلیل قیمت مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آلومینیوم خالص به دلیل فرآیند تولید ساده، امکان بازیافت صد درصدی، و قیمت ارزان می‌توان استفاده‌ی بیشتری برد ولی به شرطی که بتوان با یک هزینه مناسب خواص مورد نظر برای کاربردهای صنعتی ایجاد شود. حال می‌توان با استفاده از روش ساده و کم هزینه‌ای مثل فرآیند نورد تجمعی که توانایی بهبود خواص مکانیکی تا چهار برابر به صورت تولید پیوسته و عدم نیاز به قالب و تجهیزات با قیمت بالا را دارد بهره‌ی بیشتری برد. در این تحقیق عرض نمونه‌ی اولیه 70 میلی‌متر در نظر گرفته شد که نسبت به نمونه‌های مشابه تولید شده بالاترین عرض در نمونه‌های با روش نورد تجمعی می‌باشد. اهمیت این امر زمانی مشخص می‌شود که نمونه‌های تولیدی قبلی امکان بررسی برخی از آزمون‌های مکانیکی به صورت تجربی را نداشته و بیشتر کارهای صورت گرفته در زمینه‌های متالورژیکی می‌باشد. برای تحقق این امر و به منظور تولید نمونه‌ی آلومینیوم از نورد آزمایشگاهی با توان پایین 2 تن استفاده شد و خواص مکانیکی به وسیله آزمون کشش تک‌محوره و آزمون میکروسختی و همچنین مکانیزم شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، در گذرهای فرد مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بررسی شکست به صورت کامل و مطابق با عکس‌های سطح مقطع شکست مورد بررسی قرار گرفت و در انتها مکانیزم شکست برای نمونه‌های تولید شده مشخص شد.

## 2-روش تحقیق

### 2-1- مواد تحقیق

ویژگی‌ها و ترکیب شیمیایی آلومینیوم 1050 با ضخامت 1 میلی‌متر در جدول 1 ارائه شده است. قبل از انجام عملیات نورد تجمعی به دلیل دستیابی به ساختار کاملاً هم محور، نمونه‌ها تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. عملیات آنیل به مدت یک ساعت و در دمای 380 درجه سانتی‌گراد و در کوره‌ی صورت گرفت. خنک‌کاری نمونه‌های آنیل شده به وسیله هوا و در کوره انجام شد.

### 2-2- فرآیند نورد تجمعی

به منظور بررسی خواص مکانیکی و شکست، ورق چند لایه آلومینیوم-آلومینیوم تولید شده به روش نورد تجمعی، نمونه‌ها در ابعاد 100 میلی‌متر طول، 70 میلی‌متر عرض و 1 میلی‌متر ضخامت بریده شد. شماتیک فرآیند نورد تجمعی در "شکل 1" نشان داده شده است. بر این اساس ابتدا دو قطعه از ورق اولیه با استفاده از حمام استون چربی‌زدایی شده و توسط برس فولادی با ضخامت هر 0.4 برای هر سیم خراشیده و زبر می‌شوند و سپس دو ورق روی هم قرار داده می‌شوند. به منظور جلوگیری از سر خوردن و لغزش آن‌ها بر روی هم، از چهار گوشه سوراخ کرده و توسط سیم فولادی بهم محکم بسته می‌شوند و سپس پیوند و اتصال نوردی با اعمال 50 درصدی کاهش ضخامت برقرار می‌شود. به منظور جلوگیری از اکسید شدن لایه‌های سطحی و به دنبال آن برای برقراری پیوند با استحکام بیشتر، بهتر است زمان بین آماده‌سازی سطوح (پولیش مکانیکی) و عملیات نورد کمتر شود. پس از ایجاد پیوند اولیه، سپس نمونه‌ها از وسط و به طور مساوی بریده شده و مراحل قبل

از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است. این مواد که با نام ابرفلز<sup>1</sup> شناخته می‌شوند، خواص بی‌نظیری همانند استحکام زیاد در دمای محیط، خاصیت سوپر پلاستیک در دمای بالا و نرخ کرنش کم و مقاومت عالی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهند [3]. در حالت کلی ساخت این مواد در دسته روش بالا به پایین<sup>2</sup> و روش پایین به بالا<sup>3</sup> قرار می‌گیرد [4]. یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت مواد ریزساختار، روش تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>4</sup> می‌باشد، که در دسته بالا به پایین قرار می‌گیرد [5]. فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید مواد فلزی با اندازه دانه‌ی میکرومتر و نانومتری در مقیاس صنعتی می‌باشد [7,6]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، تنها برای فلزات قابل کاربرد می‌باشند. در تمامی این روش‌ها بلورهای داخل فلزات تحت فشار زیاد و در معرض تنش برشی بالایی قرار می‌گیرند و این کار موجب کاهش اندازه بلور فلزات می‌شود. ویژگی مشترک و منحصربه‌فرد این فرآیندها، ثابت بودن ابعاد نمونه‌ی اولیه و عدم تغییر شکل ظاهری آن حین فرآیند است که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا در ماده به راحتی میسر می‌شود. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، درحالی‌که شکل نمونه تغییری نکرده است [8]. تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری پیشنهاد شده‌اند و هم اکنون نیز در حال توسعه و گسترش می‌باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به فرآیندهای تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد<sup>5</sup> [9]، تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار<sup>6</sup> [10]، و فرآیند نورد تجمعی<sup>7</sup> [11-13] و غیره اشاره کرد.

فرآیند نورد تجمعی به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک و به منظور دستیابی به ساختاری با اندازه دانه‌ی نانومتری ابداع شد. مهم‌ترین برتری فرآیند نورد تجمعی نسبت به دیگر روش‌های تغییر شکل پلاستیک، قابلیت تولید پیوسته‌ی ورق‌های فلزی فوق العاده ریزدانه و عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا می‌باشد که در نتیجه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بودن آن است [12]. در سال 1998 سایتو و همکاران در زمینه‌ی تغییر شکل پلاستیک شدید جهت دستیابی به مواد فلزی ریزساختار فرآیند نورد تجمعی را ابداع نمودند [11-13]. تا کنون مواد زیادی با استفاده از روش نورد تجمعی تولید شده و خواص مکانیکی، ریزساختار و بافت مورد بررسی قرار گرفته است، که از جمله آن‌ها می‌توان به آلومینوم خالص و آلیاژهای آن [14-18]، مس [19-21]، تیتانیوم [22، 23]، منیزیم [24، 25]، برنج [26] و فولاد [27، 28] اشاره کرد. نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته بر روی مواد مختلف بالا حاکی از بهبود خواص مکانیکی مانند افزایش استحکام تا سه الی چهار برابر می‌باشد البته این بهبود استحکام در آلیاژهای آلومینیوم بیشتر می‌باشد و همچنین این فرآیند بیشتر برای فلزات سبک مانند آلومینیوم و منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا مورد توجه می‌باشد. البته فلزات دیگر نیز به دلیل بهبود خواص مکانیکی و همچنین تولید کامپوزیت‌های چندلایه فلزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به-

<sup>1</sup> Super metal

<sup>2</sup> Top-down procedure

<sup>3</sup> Bottom-up procedure

<sup>4</sup> Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>5</sup> High Pressure Torsion

<sup>6</sup> Equal Channel Angular Pressing

<sup>7</sup> Accumulative Roll Bonding

جدول 1 ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مواد تحقیق

Material	Chemical composition (wt. %)	Sheet dimensions (l, w, t) (mm)	Hardness (HVN)	Elongation (%)	Yield Strength (MPa)
Al 1050_Anealed	99.44 Al, 0.406 Fe, 0.121 Si, 0.033 Cu	100, 70, 1	25	35	39

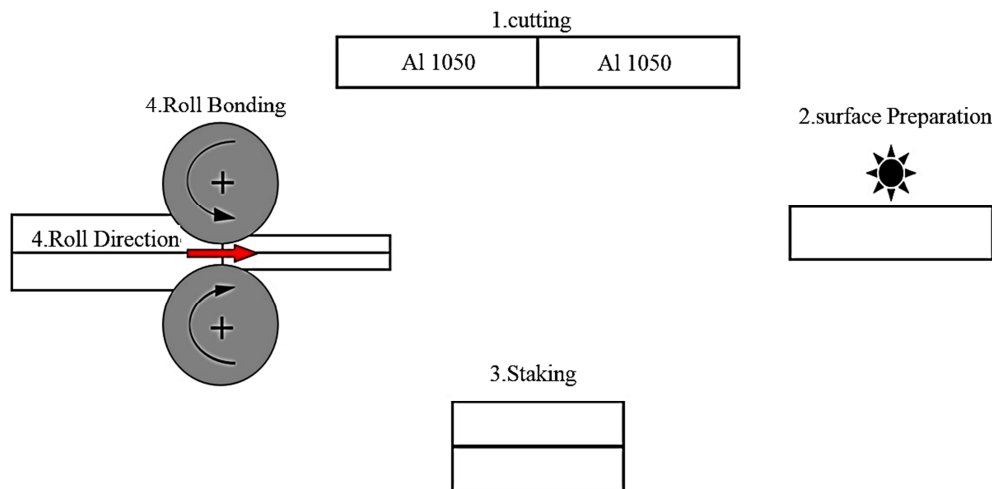


Fig.1 Schematic illustration of ARB process

شکل 1 شماتیک فرآیند نورد تجمعی

بعد از انجام آزمون کشش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. در "شکل 2"، دو نمونه از ورق های چندلایه پس از آزمون کشش تک محوره مشاهده می شود. معمولاً دو مکانیزم برای شکست نرم حاکم است؛ که این دو عامل در موقعیت های مختلف برای ایجاد شکست نرم با یکدیگر مشارکت دارند. در حالت اول برای شکست نرم، در نزدیکی محل شکست به علت تنش های اعمال شده حفرات و میکرو حفرات ایجاد شده و با افزایش تنش رشد می کنند. اما در حالت دوم، گسیختگی و شکست توسط برش داخلی میان حفرات رخ می دهد که در آن تغییر شکل برشی ساده حکم فرما می باشد [19]. در "شکل 3" مقطع شکست ورق اولیه بعد از آنیل نمایش داده شده است. مکانیزم غالب شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار هستند، تشکیل حفره و سپس شکست نرم است. شکست نرم در بیشتر مواد به صورت دیمپل های هم محور یا نیم کره ای ظاهر می شود. این نوع شکست با تشکیل میکرو حفرات، پیوستگی، انتشار ترک یا شکست برشی در زاویه ای نسبتاً در راستای جهت کشش رخ می دهد [29]. البته در فلزات با چقرمگی بالا اندازه ترک ها و حفرات بسیار بزرگتر می باشد و خود این حفرات با بزرگتر شدن موجب شکست می شوند ولی در سایر موارد از پیوستگی میکرو حفرات، ترک ها ایجاد و گسترش می یابند. اما مکانیزم

شامل چربی زدایی به وسیله استون، خشک کردن به وسیله هوا، زبر کردن به وسیله برس فولادی، سوراخ کاری گوشه ها، بستن نمونه ها روی هم و عملیات نورد با کاهش 50 درصدی ضخامت تکرار می شود. عملیات نورد به وسیله نورد آزمایشگاهی با قطر غلطک های 110 میلی متر، در دمای اتاق، بدون عملیات حرارتی بین پاسی و استفاده از روان کار، تا هفت سیکل انجام شد.

### 2-3- بررسی خواص مکانیکی و شکست

برای سیکل های مختلف، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد بوسیله ماشین وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M-9 آماده شد. آزمون کشش تک محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  و با استفاده از دستگاه SANTAM S20 انجام شد. مقدار ازدیاد طول نمونه ها از طریق اندازه گیری طول گیج، قبل و بعد از آزمایش کشش تعیین شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه ها با استفاده از دستگاه جنیوس تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) اندازه گیری شد. قبل از انجام آزمون میکروسختی، جهت تسهیل در جابه جایی نمونه ها از مانت سرد استفاده شد. پس از مانت نمونه ها، سطح نمونه ها به کمک دستگاه گردان پولیش و با استفاده از سنباده های 800، 1000 و 1200 پرداخت شد. میکروسختی برای هر نمونه به صورت رندوم در بیش از 10 نقطه مختلف اندازه گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد.

سطح نمونه های شکست، پس از انجام آزمایش کشش تک محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه ها و تعیین مکانیزم شکست در سیکل های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مورد بررسی قرار گرفت.

### 3- نتایج و بحث

#### 1-3- شکست نگاری

مقطع شکست ورق های اولیه و چندلایه آلومینیوم-آلومینیوم فرآوری شده



Fig. 2 fracture of sample after uniaxial tensile test

شکل 2 شکست نمونه بعد از انجام آزمون کشش تک محوره

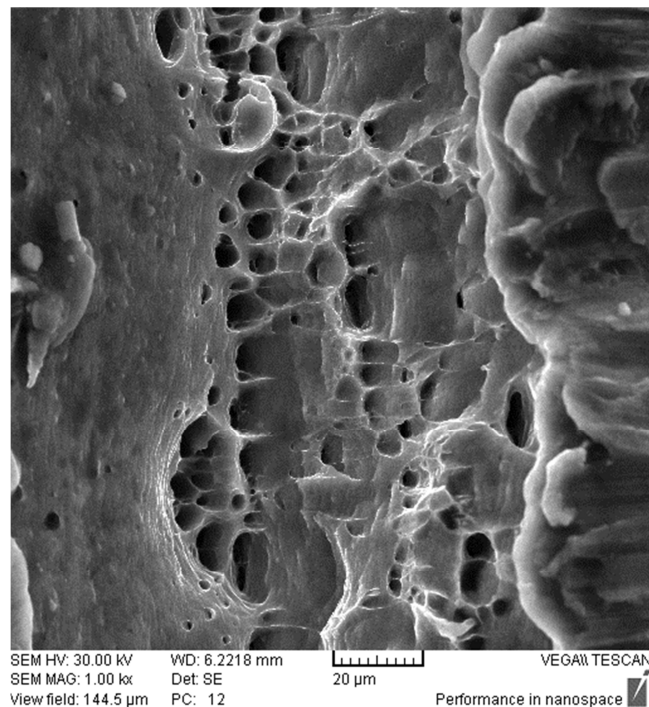


Fig. 3 Tensile fracture surfaces of initial sample

شکل 3 سطح مقطع شکست آلومینیوم آنیل شده

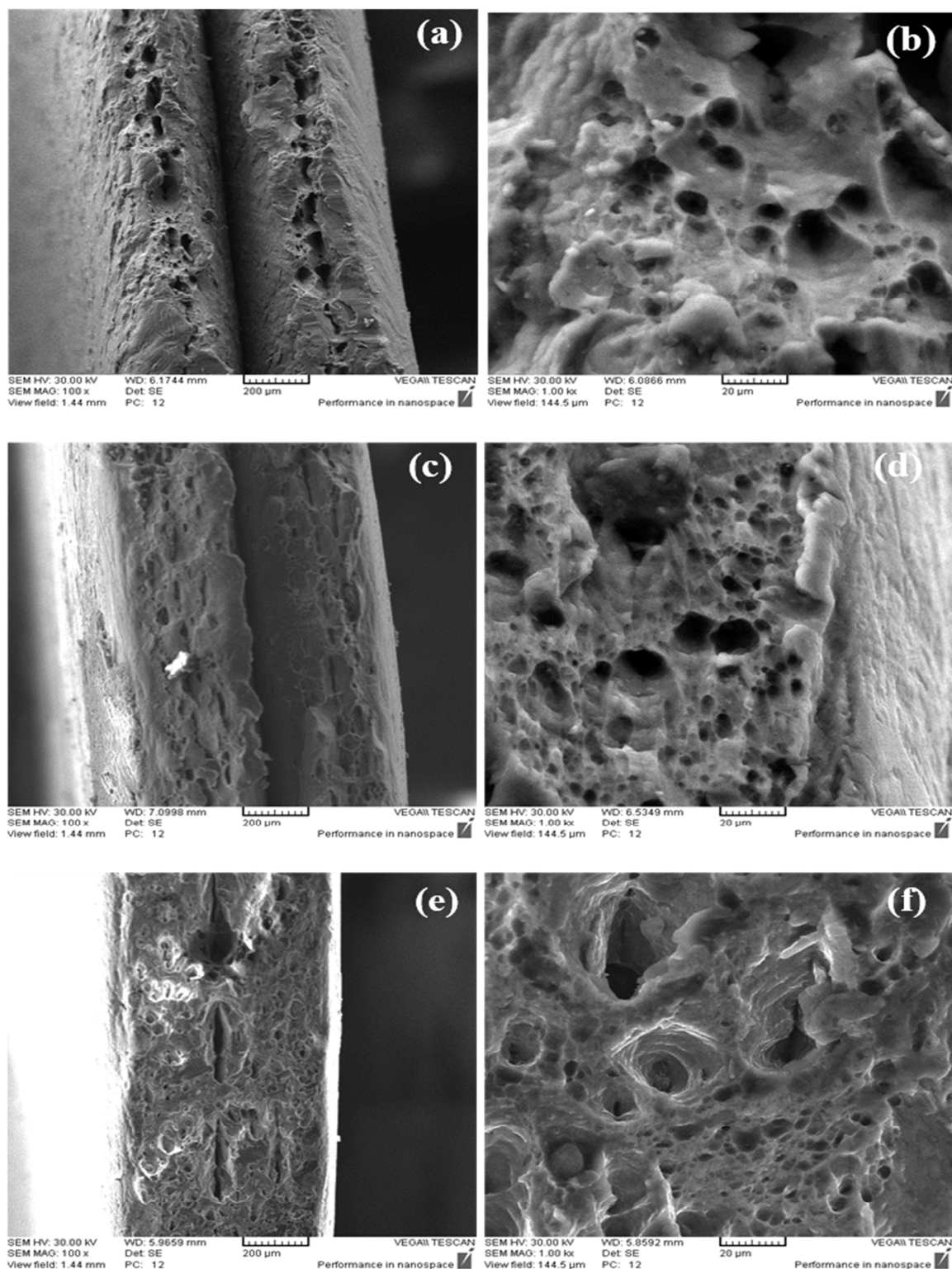
مکانیزم شکست از شکست نرم برای نمونه‌ای آنیل شده اولیه به شکست نرم برشی برای نمونه‌ای نورد تجمعی شده تغییر می‌کند. به صورت خلاصه می‌توان گفت قبل از فرآیند نورد تجمعی، نمونه‌ها رفتار شکست نرم را از خود نشان می‌دهند که حفره‌های عمیق و کشیده نشان‌دهنده‌ی آن است و به این حفرات، تخلخل برشی نیز گفته می‌شود و پس از آن با افزایش گذرهای فرآیند نورد تجمعی (افزایش کرنش اعمالی)، به ترتیب تخلخل برشی کم‌عمق و کشیده مشاهده می‌گردد که حاکی از تغییر مکانیزم شکست از نرم به نرم برشی می‌باشد.

### 3-2- خواص مکانیکی

در "شکل 5 و 7"، به ترتیب، نمودارهای تنش-کرنش مهندسی و تغییرات استحکام کششی و ازدیاد طول نمونه‌ی فلزی چند لایه آلومینیوم-آلومینیوم نورد تجمعی شده برحسب سیکل‌های فرد فرآیند و نمونه اولیه نشان داده شده است. در نمودار مشخص است که، با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، استحکام کششی افزایش می‌یابد. خواص کششی فلزات چندلایه به میزان خواص فازهای تشکیل دهنده و نرخ کارسختی فاز نرم بستگی دارد. تغییرات استحکام کششی در فلزاتی که تحت تغییر شکل شدید پلاستیک قرار می‌گیرند، می‌تواند ناشی از دو دلیل مهم و اصلی، کارسختی به وسیله ناهنجاری‌ها و ریزش دانه‌ها باشد [25]. در پایان سیکل اول فرآیند نورد تجمعی، استحکام و ازدیاد طول به ترتیب شدیداً افزایش و کاهش می‌یابد، که عامل اصلی آن، افزایش چگالی ناهنجاری ناشی از کرنش سختی، اعمال کرنش زیاد و کار سرد می‌باشد و این مکانیزم در سیکل‌های ابتدایی فرآیند نورد تجمعی قالب می‌باشد. در سیکل‌های بعدی با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، استحکام کششی با نرخ و شیب کمتری نسبت به سیکل اول، افزایش می‌یابد و مقدار ازدیاد طول هم پس از پایان سیکل اول افزایش می‌یابد که اصلاح دانه‌ها و کاهش تاثیر کارسختی از عوامل اصلی این تغییرات می‌باشد [16]. پس به طور خلاصه می‌توان گفت که افزایش استحکام و بهبود خواص

شکست ترد کاملاً با موارد بالا متفاوت است و شکست ترد بدون تشکیل میکروحفرات و تغییر شکل در سطح شکست ایجاد می‌شود و سطح شکست ترد کامل صاف می‌باشد.

"شکل 4" سطح مقطع شکست ورق چندلایه آلومینیوم-آلومینیوم فرآوری شده با استفاده از فرآیند نورد تجمعی در بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد همچنین اثر خاصیت لایه‌ای که در سیکل‌های ابتدایی بیشتر مشاهده می‌شود با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی کاهش می‌یابد ولی همچنان این اثر وجود دارد و در پاس هفتم نیز مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی حفرات کم‌عمق تر و کوچک تر شده‌اند. براساس تحقیقات پیشین و مشاهدات انجام شده، وجود دیمل‌های کم‌عمق تر و کوچک تر در کامپوزیت‌ها و نمونه‌های چندلایه فلزی تولید شده نشان می‌دهد که نوع شکست نرم برشی است و این نوع شکست، شبیه به شکست نرم در ورق‌های اولیه است با این تفاوت که در ورق‌های اولیه عمق و اندازه حفرات بیشتر است. که این امر بالاتر بودن استحکام کششی و پایین تر بودن ازدیاد طول در کامپوزیت تولیدی نسبت به ورق‌های اولیه را نشان می‌دهد. [30,29]. در تصاویر دیمل-های هم محور و کوچک مشاهده می‌شود. به سبب تنش‌های نابرابر در سه جهت بعضی دیمل‌ها در یک یا چند جهت کشیده شده‌اند که این مشاهدات از خصوصیات شکست نرم هستند. هر دیمل نماینده‌ی یک مکان جوانه‌زنی ترک است که به فرآیند تغییر شکل پلاستیک نسبت داده شده است [31]. در نمونه‌های تولید شده آلومینیوم-آلومینیوم به روش نورد تجمعی در مقایسه با نمونه‌ی آنیل شده اولیه، حفرات و دیمل‌های موجود، با افزایش سیکل‌های این فرآیند، کوچکتر و کم عمق تر می‌شوند که این امر علاوه بر تغییر مکانیزم شکست باعث تغییر در خواص مکانیکی می‌شود. کوچک و کم عمق شدن حفرات باعث کاهش ازدیاد طول، افزایش استحکام کششی می‌شود. همچنین



**Fig.4** Tensile fracture surfaces of Al/Al multi-layered: (a) and (b) after 3cycles, (c) and (d) after 5 cycle, (e) and (f) after 7 cycles

شکل 4 سطح مقطع شکست نمونه‌ی فرآوری شده به‌وسیله فرآیند نورد تجمعی (a و b) پاس سوم، (c و d) پاس پنجم، (e و f) پاس هفتم

سیکل‌های ابتدایی به صورت واضح مشاهده می‌شود که در پایان سیکل اول نرخ افزایش استحکام زیاد می‌باشد و با افزایش سیکل‌های فرآیند این نرخ کاهش می‌یابد و همان‌طور که گفته شد، کاهش نرخ افزایش در پاس‌های ابتدایی مرتبط با کرنش سختی می‌باشد، پس به‌صورت واضح مشخص است که در سیکل‌های ابتدایی کرنش سختی نقش اصلی افزایش استحکام را ایفا

مکانیکی ناشی از دو مکانیزم کرنش سختی و اصلاح ریزساختار می‌باشد. که در سیکل‌های ابتدایی فرآیند، مکانیزم کرنش سختی و در سیکل‌های بعدی اصلاح دانه‌ها نقش قالب را ایفا می‌کند. البته در سیکل‌های پایانی نیز اثر کرنش سختی مشهود می‌باشد ولی به دلیل افزایش چگالی ناهنجاری با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی اثر آن کم می‌شود. این حالت را در

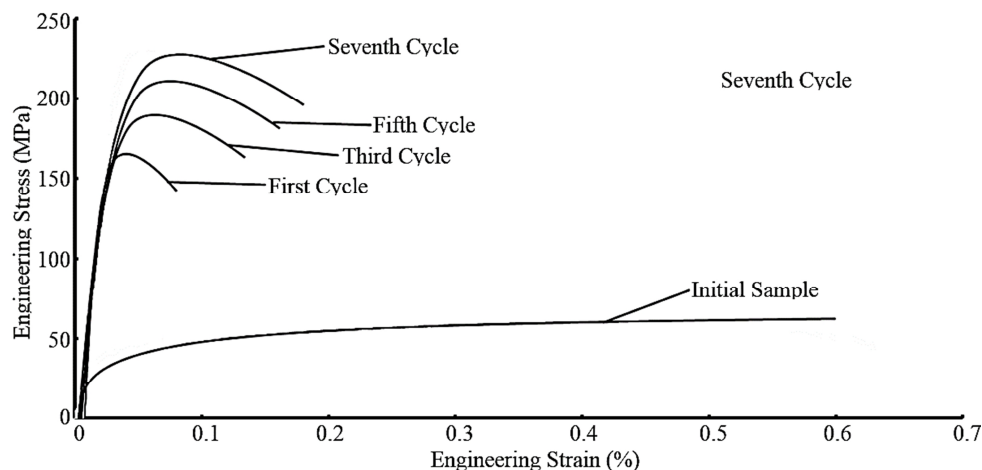


Fig. 5 engineering stress-strain curves of initial sample and Al/Al multi-layered strips in the different ARB cycles

شکل 5 تنش-کرنش مهندسی بر حسب سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی

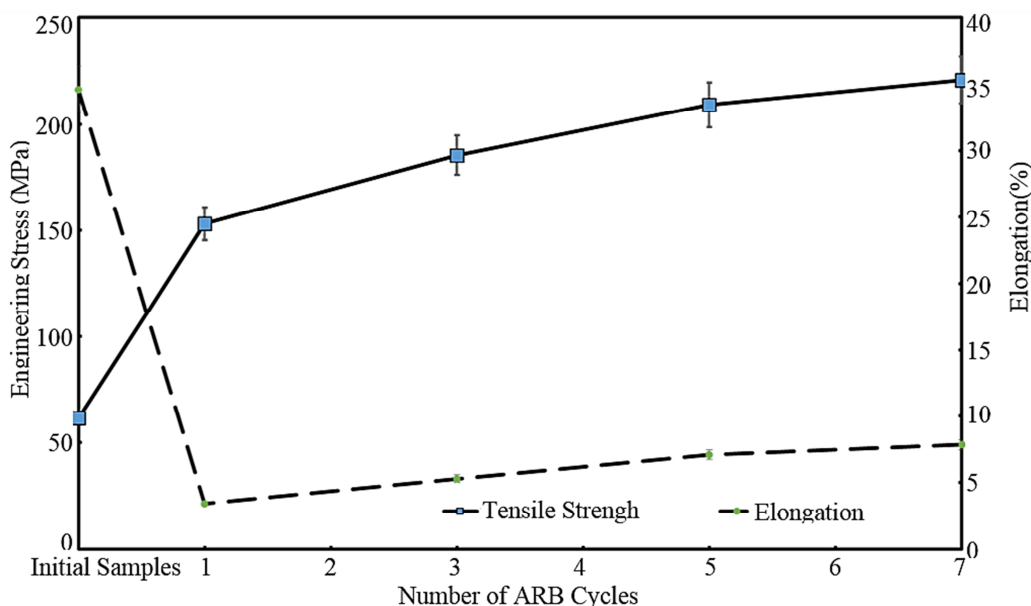


Fig. 6 Variations of tensile, yield strength and elongation for initial sample and Al/Al multi-layered strips in the different ARB cycles

شکل 6 تغییرات استحکام کششی و ازدیاد طول بر حسب سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی

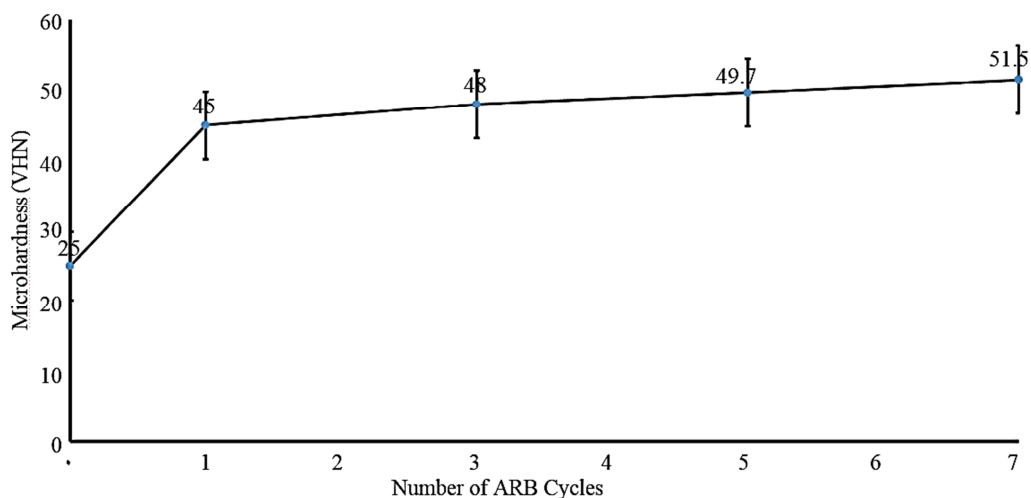


Fig. 7 Micro hardness variations for initial sample and Al/Al multi-layered strips in the different ARB cycles.

شکل 7 تغییرات میکروسختی ویکرز بر حسب سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی



و در مراحل بعدی این نرخ افزایش کاهش می‌یابد ولی تا پایان سیکل هفتم این افزایش ادامه دارد و در پایان این سیکل از فرایند مقدار استحکام کششی به حدود 230 مگاپاسکال می‌رسد که نسبت به نمونه آنیل شده بیش از سه برابر شده است.

3- پس از گذر اول، ازدیاد طول با شیب زیاد کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، ازدیاد طول با نرخ کم افزایش می‌یابد و در پایان سیکل هفتم به بیشترین مقدار خود حدود 8% می‌رسد که نسبت به پاس اول، بیش از دو برابر شده است.

4- با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، میکروسختی افزایش می‌یابد به طوری که در سیکل اول با نرخ بیشتر و در سیکل‌های بعدی این نرخ کاهش می‌یابد و در سیکل‌های پایانی تقریباً ثابت می‌شود که به ترتیب به دلیل افزایش و اشباع چگالی ناهنجاری ناشی از کرنش سختی می‌باشد.

### 5-مراجع

- [1] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.
- [2] L. Li, K. Nagai, F. Yin, Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2016.
- [3] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, High-strength and highly-uniform composite produced by anodizing and accumulative roll bonding processes, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 10, pp. 4816-4822, 2010.
- [4] T. C. Lowe, R. Z. Valiev, The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement, *Jom*, Vol. 56, No. 10, pp. 64-68, 2004.
- [5] P. Shingu, K. 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 Engineering: A*, Vol. 304, pp. 399-402, 2001.
- [6] B. Movchan, F. Lemkey, Mechanical properties of fine-crystalline two-phase materials, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 224, No. 1, pp. 136-145, 1997.
- [7] Y. Chino, M. Mabuchi, R. Kishihara, H. Hosokawa, Y. Yamada, C. e. Wen, K. Shimojima, H. Iwasaki, Mechanical properties and press formability at room temperature of AZ31 Mg alloy processed by single roller drive rolling, *Materials Transactions*, Vol. 43, No. 10, pp. 2554-2560, 2002.
- [8] H. Pirgazi, A. Akbarzadeh, R. Petrov, L. Kestens, Microstructure evolution and mechanical properties of AA1100 aluminum sheet processed by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 497, No. 1, pp. 132-138, 2008.
- [9] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in materials science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
- [10] V. Segal, Materials processing by simple shear, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 197, No. 2, pp. 157-164, 1995.
- [11] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
- [12] N. Tsuji, Y. Saito, S. H. Lee, Y. Minamino, ARB (Accumulative Roll-Bonding) and other new Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 5, No. 5, pp. 338-344, 2003.
- [13] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 16, pp. 4146-4151, 2010.
- [14] S. Lee, Y. Saito, T. Sakai, H. Utsunomiya, Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 325, No. 1, pp. 228-235, 2002.
- [15] M. Raei, M. R. Toroghinejad, R. Jamaati, Nano/ultrafine structured AA1100 by ARB process, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 11, pp. 1352-1356, 2011.

می‌کند و با افزایش سیکل‌های فرآیند اثر آن کاهش می‌یابد. همچنین در حالت اشباع چگالی ناهنجاری، تقریباً اثر آن از بین می‌رود و می‌توان آن را نادیده گرفت. همچنین با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، ضخامت لایه‌ها و اثر خاصیت لایه‌ای کاهش می‌یابد ولی این اثر از بین نمی‌رود و در پایان سیکل هفتم نیز قابل مشاهده می‌باشد. همچنین با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، ساختار یکنواخت‌تر همراه با پیوندهای قوی‌تر ایجاد می‌شود. بیشترین استحکام کششی و تسلیم برای نمونه‌ی تولید شده به ترتیب 231.7 و 198 مگاپاسکال می‌باشد که در پایان سیکل هفتم به دست می‌آید که نسبت به نمونه آنیل بیش از سه برابر می‌شود. مقدار ازدیاد طول نیز، در پایان سیکل هفتم به بیشترین مقدار می‌رسد که نسبت به مقدار ازدیاد طول در پایان سیکل اول بیش از دو برابر شده است. افزایش ازدیاد طول سیکل‌های پایانی و در مقایسه با سیکل‌های ابتدایی به‌خصوص سیکل اول، به دلیل کاهش اثر نرخ کارسختی در سیکل‌های بالاتر و همچنین حاکم بودن مکانیزم اصلاح ریزدانه در سیکل‌های پایانی و بهبود ریزساختار می‌باشد. با استفاده از تصاویر سطح مقطع شکست در "شکل‌های 2 و 3" نیز دلیل تغییرات خواص مکانیکی قابل توجیه می‌باشد که با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی و تغییر مکانیزم شکست، افزایش استحکام کششی و کاهش ازدیاد طول در مقایسه با نمونه اولیه در ارتباط است.

"شکل 7" تغییرات میکروسختی ویکرز نمونه‌ی نورد تجمعی شده برحسب پاس‌های فرآیند و نمونه‌ی آنیل شده را نشان می‌دهد. در نمودار "شکل 6" واضح است که با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی مقدار میکروسختی افزایش می‌یابد. در پایان سیکل اول مقدار سختی با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند و از مقدار 25 ویکرز نمونه‌ی آنیل، به مقدار 45 ویکرز می‌رسد که این افزایش شدید به دلیل میزان بالای افزایش چگالی ناهنجاری ناشی از کرنش سختی می‌باشد. پس از پایان سیکل اول و با افزایش سیکل‌های فرآیند، میزان سختی با شیب کمتری افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش اثر کرنش سختی می‌باشد. همچنین میزان میکروسختی در سیکل‌های پایانی تقریباً ثابت می‌شود که به دلیل اشباع شدن چگالی ناهنجاری و از بین رفتن اثر نرخ کارنش سختی می‌باشد [32]. مقدار میکروسختی ویکرز برای آلومینیوم نورد تجمعی شده در پایان سیکل هفتم به بیشترین مقدار خود به میزان 51.5 ویکرز می‌رسد که نسبت به نمونه‌ی اولیه بیش از دو برابر می‌شود.

### 4-نتایج

در این تحقیق خواص مکانیکی، مکانیزم شکست آلومینیوم خالص تجاری تولید شده از طریق فرآیند نورد تجمعی در گذرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

1- عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست نشان می‌دهد که با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، ضخامت لایه‌ها کوچک و اثر خواص لایه‌ای کمتر می‌شود ولی در سیکل پایانی نیز همچنان وجود دارد. در نمونه آنیل شده شکست نرم همراه با دیمیل‌های عمیق کروی شکل با اندازه بزرگتر نسبت به نمونه‌های نورد تجمعی شده مشخص است. همچنین برای نمونه‌های پیوند نوردی، شکست نرم همراه با منطقه برشی مشاهده شد ولی میزان تغییر شکل کم و گلوئی شدن بسیار کوچک اتفاق افتاده است که باعث تغییر مکانیزم شکست از شکست نرم به نرم برشی شده است.

2- با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، استحکام کششی افزایش می‌یابد که این افزایش در سیکل ابتدایی به دلیل کارسرد شیب بیشتری دارد

- [25] M. Zhan, Y. Li, W. Chen, W. Chen, Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy sheets severely deformed by accumulative roll-bonding, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 22, pp. 9256-9261, 2007.
- [26] S. Pasebani, M. R. Toroghinejad, Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 3, pp. 491-497, 2010.
- [27] A. L. d. M. Costa, A. C. d. C. Reis, L. Kestens, M. S. Andrade, Ultra grain refinement and hardening of IF-steel during accumulative roll-bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 406, No. 1, pp. 279-285, 2005.
- [28] N. Tsuji, R. Ueji, Y. Minamino, Nanoscale crystallographic analysis of ultrafine grained IF steel fabricated by ARB process, *Scripta Materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 69-76, 2002.
- [29] M. Naseri, A. Hassani, M. Tajally, Fabrication and characterization of hybrid composite strips with homogeneously dispersed ceramic particles by severe plastic deformation, *Ceramics International*, Vol. 41, No. 3, Part A, pp. 3952-3960, 4//, 2015.
- [30] 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, pp. 386-393, 2012.
- [31] M. Reihanian, F. K. Hadadian, M. Paydar, Fabrication of Al–2vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC hybrid composite via accumulative roll bonding (ARB): An investigation of the microstructure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 607, pp. 188-196, 2014.
- [32] M. Alizadeh, M. Samiei, 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.
- [16] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. Hong, Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- [17] X. Huang, N. Tsuji, N. Hansen, Y. Minamino, Microstructural evolution during accumulative roll-bonding of commercial purity aluminum, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 340, No. 1, pp. 265-271, 2003.
- [18] M. R. Rezaei, M. R. Toroghinejad, F. Ashrafizadeh, Production of nano-grained structure in 6061 aluminum alloy strip by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 529, pp. 442-446, 2011.
- [19] M. Shaarbaf, M. R. Toroghinejad, Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1, pp. 28-33, 2008.
- [20] N. Takata, S.-H. Lee, N. Tsuji, Ultrafine grained copper alloy sheets having both high strength and high electric conductivity, *Materials Letters*, Vol. 63, No. 21, pp. 1757-1760, 2009.
- [21] Y. Jang, S. Kim, S. Han, C. Lim, C. Kim, M. Goto, Effect of trace phosphorous on tensile behavior of accumulative roll bonded oxygen-free copper, *Scripta materialia*, Vol. 52, No. 1, pp. 21-24, 2005.
- [22] D. Terada, S. Inoue, N. Tsuji, Microstructure and mechanical properties of commercial purity titanium severely deformed by ARB process, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 5, pp. 1673-1681, 2007.
- [23] D. Raducanu, E. Vasilescu, V. Cojocaru, I. Cinca, P. Drob, C. Vasilescu, S. Drob, Mechanical and corrosion resistance of a new nanostructured Ti–Zr–Ta–Nb alloy, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol. 4, No. 7, pp. 1421-1430, 2011.
- [24] J. Del Valle, M. Pérez-Prado, O. Ruano, Accumulative roll bonding of a Mg-based AZ61 alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 410, pp. 353-357, 2005.