



مروری بر فرآوری ورق‌های فلزی فوق ریزدانه و نانو ساختار با استفاده از فرایند نورد جمعی اتصالی

داود رحمت آبادی¹، قادر فرجی²، رامین هاشمی^{3*}

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی فلزات، اندازه دانه می‌باشد. فلزات فوق‌ریزدانه دارای میانگین اندازه دانه 100-1000 نانومتر و فلزات نانو ساختار دارای میانگین اندازه دانه کمتر از 100 نانومتر هستند. مواد فوق‌ریزدانه و نانو ساختار به‌عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی شناخته می‌شوند که در مقایسه با فلزات درشت‌دانه دارای خواص مکانیکی و فیزیکی قابل ملاحظه‌ای هستند. در دو دهه‌ی اخیر، به‌دلیل خواص نظیر استحکام بالا، شکل‌پذیری و چقرمگی بالا، مقاوت به خوردگی خوب و خاصیت سوپرپلاستیسیته بالا، ساخت این مواد مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، روش‌های زیادی تحت‌عنوان تغییر شکل پلاستیک شدید ارائه شده است و هم‌اکنون نیز در حال تکامل و گسترش می‌باشند. در این فرایندها، با وجود فشار هیدرواستاتیکی بالا و عدم تغییر ابعاد نمونه در حین فرایند، امکان اعمال کرنش‌های بسیار بالا میسر می‌شود که متعاقباً خواص مکانیکی مطلوب و مواد فوق‌ریزدانه و نانو ساختار حاصل می‌شود. فرایند نورد جمعی یکی از روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک می‌باشد. فرایند نورد جمعی روشی پرکاربرد، ساده، کم‌هزینه با قابلیت صنعتی می‌باشد که توانایی تولید فلزات فوق ریزدانه و نانو ساختار را دارد. در این تحقیق فلزات سبک نظیر آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم و همچنین فلزات پرکاربرد مس و فولاد مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین خواص مکانیکی، شکست‌نگاری و ویژگی‌های ریزساختاری فلزات فوق‌ریزدانه و نانو ساختار تولید شده به روش نورد جمعی با نمونه‌های اولیه مقایسه می‌شود و مکانیزم‌های حاکم بر فرایند نورد جمعی که باعث تغییرات خواص مکانیکی و ریزساختاری می‌شود مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 آبان 1397
پذیرش: 15 اسفند 1397
ارائه در سایت: شهریور 1398

کلیدواژه‌ها:

فلزات فوق‌ریزدانه و نانو ساختار
تغییر شکل پلاستیک شدید
نورد جمعی
خواص مکانیکی و ریزساختاری

Review on accumulative roll bonding of ultrafine grained and nanostructured sheets

Davood Rahmatbadi¹, Ghader Faraji², Ramin Hashemi^{1*}

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

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

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

Article Information

Original Research Paper
Received 15 November 2018
Accepted 6 March 2019
Available August 2019

Keywords:

MAX Phase
Production mechanism
Powder technology
Nanocrystalline

Abstract

One of the most important factors affecting the mechanical, physical and chemical properties of metals, are crystal structure and grain size. Ultrafine metals with an average grain size of 1000-100nm and nanostructured metals have an average grain size of less than 100nm. Ultrafine and nanostructured materials are known as a new generation of metal products, which have remarkably mechanical and physical properties in comparison to coarse-grained metals. In the last two decades, due to good properties such as high strength, high ductility and toughness, good corrosion resistance and high superplasticity properties, these materials have been considered by many researchers. In recent years, many methods have been proposed for severe plastic deformation and are now being developed and expanded. In these processes, in spite of the high hydrostatic pressure and the unaltered dimensions of the sample during the process, it is possible to apply very high strains, which results in the desired mechanical properties and ultrafine grained and nanostructured materials. The accumulative roll bonding process is one of the methods of SPD. ARB process is simple, extensive use, low-cost, industrially capability method that can produce ultrafine and nanostructured metals. In this research, light metals such as aluminum, magnesium and titanium and also extremely used metal such as copper and steel are discussed. Also, mechanical properties, fractography and microstructural properties of ultrafine and nanostructured metals produced by ARB are compared with initial samples and the mechanisms governing of ARB process that cause changes in mechanical and microstructural properties are analyzed.

Please cite this article using:

D. Rahmatbadi, Gh. Faraji, R. Hashemi, Review on accumulative roll bonding of ultrafine grained and nanostructured sheets, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 37-51, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.sid.ir

1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی فلزات، اندازه دانه (مرزدانه‌ها) است. کاهش اندازه دانه یا افزایش مرزدانه‌ها یکی از مکانیزم‌های استحکام‌بخشی از طریق ایجاد موانع برای حرکت ناب‌جایی‌ها محسوب می‌شود. بر همین اساس، مواد فلزی بر اساس میانگین اندازه دانه به چهار دسته کلی درشت دانه، ریزدانه، فوق ریزدانه و نانو ساختار دسته‌بندی می‌شوند که در مواد نانو ساختار میانگین اندازه دانه کمتر از صد نانومتر و در مواد فوق ریزدانه کمتر از هزار نانومتر می‌باشد. همچنین طبق این دسته‌بندی، مواد با میانگین اندازه دانه کمتر از ده میکرون ریزدانه و بزرگتر از آن را درشت دانه در نظر می‌گیرند. مواد ریزدانه¹ و فوق ریزدانه² به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی شناخته می‌شوند که خواص مکانیکی و فیزیکی قابل ملاحظه‌ای در مقابل مواد درشت دانه³ از خود نشان می‌دهند [1]. مواد فوق ریزدانه در دماهای پایین‌تر و نرخ کرنش‌های بالاتر، خاصیت شکل‌پذیری عالی از خود نشان می‌دهند. همچنین این مواد به خاطر خواصی نظیر استحکام بالا، شکل‌پذیری و چقرمگی مطلوب، مقاومت به خوردگی خوب و خاصیت سوپرپلاستیسیته بالا مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند [2, 3]. به همین منظور، در سال‌های اخیر و به‌خصوص دهه‌ی گذشته، روش‌های تولید و بررسی خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه نانومتری یا فوق‌ریزدانه موضوع بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است. در حالت کلی ساخت مواد فوق‌ریزدانه و نانو ساختار در دو دسته روش بالا به پایین⁴ و روش پایین به بالا⁵ قرار می‌گیرد [4]. یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار، روش تغییر شکل پلاستیک شدید⁶ می‌باشد، که در دسته بالا به پایین قرار می‌گیرد [5]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، در عین سادگی و ارزان بودن قابلیت تولید مواد فوق‌ریزدانه با ابعاد بزرگ را دارند. در تمامی روش‌ها و فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، بلورهای داخل فلزات تحت فشار زیاد و در معرض تنش برشی بالایی قرار می‌گیرند و این کار موجب کاهش اندازه بلور فلزات می‌شود [6]. ویژگی مشترک و منحصربه‌فرد این فرایندها، ثابت بودن ابعاد نمونه‌ی اولیه و عدم تغییر شکل ظاهری آن حین فرایند است،

که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا در ماده به راحتی میسر می‌شود. همچنین وجود فشار هیدرواستاتیکی در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک باعث جلوگیری از ایجاد و رشد ترک شده و باعث حذف محدودیت در اعمال کرنش‌های بالا می‌شود. به این ترتیب در اثر اعمال کرنش زیاد، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری و متعاقباً بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، درحالی‌که شکل و ابعاد نمونه تغییری نکرده است [7]. در کنار کاهش اندازه دانه، افزایش چگالی ناب‌جایی ناشی از انجام کار سرد یکی دیگر از عوامل مهم در بهبود خواص مکانیکی در این فرایندهاست. تاکنون فرایندهای موفق زیادی برای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید 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 فرایندهای تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد⁷ [8, 9]، تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار⁸ [10]، فرایند نورد تجمعی⁹ [11-13]، فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای [14, 15] و غیره اشاره کرد.

فرایند نورد تجمعی به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک و به منظور دستیابی به ساختاری با اندازه دانه‌ی نانومتری در سال 1998 توسط سایتو و همکاران ارائه شد [11-13]. در سال‌های اخیر، فرایند نورد تجمعی به دلیل ویژگی‌های کاربردی و منحصر به فرد، در مقایسه با سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، رشد و توسعه سریع‌تری داشته است [16]. مهم‌ترین برتری فرایند نورد تجمعی نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، قابلیت تولید پیوسته‌ی ورق‌های فلزی فوق‌ریزدانه و نانو ساختار، عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا و قابلیت تولید انواع کامپوزیت‌های پایه فلزی است [12]. فرایند نورد تجمعی، برگرفته از روش جوش نوردی و فرایندهای قدیمی‌تر تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. در واقع فرایند نورد تجمعی، تکرار چندین مرحله‌ای پیوند نوردی برای دستیابی به کرنش‌های اعمالی بالاتر است.

فرایند پیوند سرد نوردی یکی از فرایندهای قدیمی جوش کاری حالت جامد است که توسط محققین در دهه‌های گذشته با اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد¹⁰ [17] پیوند به وسیله نورد سرد¹¹ [18] پوشش به

فرایند نورد تجمعی به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک و به منظور دستیابی به ساختاری با اندازه دانه‌ی نانومتری در سال 1998 توسط سایتو و همکاران ارائه شد [11-13]. در سال‌های اخیر، فرایند نورد تجمعی به دلیل ویژگی‌های کاربردی و منحصر به فرد، در مقایسه با سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، رشد و توسعه سریع‌تری داشته است [16]. مهم‌ترین برتری فرایند نورد تجمعی نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، قابلیت تولید پیوسته‌ی ورق‌های فلزی فوق‌ریزدانه و نانو ساختار، عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا و قابلیت تولید انواع کامپوزیت‌های پایه فلزی است [12]. فرایند نورد تجمعی، برگرفته از روش جوش نوردی و فرایندهای قدیمی‌تر تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. در واقع فرایند نورد تجمعی، تکرار چندین مرحله‌ای پیوند نوردی برای دستیابی به کرنش‌های اعمالی بالاتر است.

⁷ High Pressure Torsion

⁸ Equal Channel Angular Pressing

⁹ Accumulative Roll Bonding

¹⁰ Cold Pressure Welding by Rolling

¹¹ Bonding by Cold Rolling

¹ Fine grain

² Ultrafine grain

³ Coarse grain

⁴ Top-down procedure

⁵ Bottom-up procedure

⁶ Severe Plastic Deformation (SPD)

با صنعتی شدن فرایند نورد تجمعی، تاکنون مستندات آرائه نشده است، هرچند از روش نورد تجمعی و پیوند نوردی برای تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای و پوشش دهی متناسب با خواص آن‌ها برای کاربردهای مختلف استفاده شده است. به عنوان مثال در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم/آلومینیوم که منیزیم به عنوان هسته توسط آلومینیوم پوشش داده می‌شود، آلومینیوم با محافظت از منیزیم، باعث بهبود مقاومت به خوردگی آن می‌شود و با ایجاد تنش فشاری در سطح توانایی تغییر شکل آن را نیز تقویت می‌کند [66]. همچنین کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم به دلیل خواص عالی و همزمان مانند چگالی پایین، استحکام بالا و مقاومت به خوردگی عالی به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها، به ویژه هوافضا، خودرو و محصولات الکترونیکی، با هدف کاهش چشم‌گیر وزن قطعات سازه و صرفه‌جویی در هزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [67].

در این پژوهش، به دلیل حجم بالای نمونه‌های تولیدی با روش نورد تجمعی و تمرکز بیشتر بر روی مباحث آرائه شده، تنها به بررسی اثر فرایند نورد تجمعی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری ورق‌های لایه‌ای تک‌جنس پرداخته می‌شود. به همین منظور، ابتدا همه‌ی مراحل تولیدی یک ورق فوق‌ریزدانه با فرایند نورد تجمعی آرائه خواهد شد و سپس جمع‌بندی از نتایج بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی در نمونه‌های مختلف، مکانیزم‌های حاکم پرداخته می‌شود.

2- ساخت ورق‌های چندلایه فلزی تک جنس با فرایند

پیوند نوردی و نورد تجمعی

در فرایند پیوند سرد نوردی، دو یا چند ورق، صفحه یا نوار فلزی یا آلیاژ با جنس‌های یکسان و غیریکسان روی هم قرار می‌گیرند و سپس با گذر از یک ماشین نورد، کرنش مورد نظر اعمال می‌شود تا یک تغییر شکل مناسب برای یک اتصال حالت جامد² جامد² بین لایه‌های در تماس به دست آید. مطابق با شکل 1، قبل از اعمال نورد، عملیات آماده سازی اولیه سطحی برای لایه-هایی که در تماس با یکدیگر هستند انجام می‌شود. عملیات آماده‌سازی به منظور برداشتن هر گونه اکسید و آلودگی سطحی است که می‌تواند شامل شستن با آب و صابون، غوطه‌ور کردن در استون و برداشتن لایه‌ای از سطح توسط برس خورشیدی باشد. مهمترین مرحله در ایجاد پیوند مناسب بین لایه‌های در تماس،

وسیله نورد¹ [19] پیوند سرد نوردی [20] معرفی شده است. در این فرایند، پیوند بر اثر تغییر شکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات ایجاد می‌شود [21]. به عبارت دیگر فشار باید به اندازه کافی زیاد باشد تا باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف-های ایجاد شده روی سطح شود و این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [22]. مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای حاکم بر ایجاد پیوند به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال انجام شده است. گزارش شده است که پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [23]، درجه حرارت اتصال [24]، زمان آنیلینگ قبل و بعد از فرایند [25، 26]، سرعت نورد [27] ضخامت اولیه [23، 27]، جهت نورد [23] و حضور ذرات بین ورق [28] است [29-37]. با مشخص شدن پارامترهای اثرگذار بر پیوند لایه‌ها، محققین دریافتند که با انتخاب بهینه این پارامترها، می‌توان جوش پیوندی را برای طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، که این مواد می‌توانند از یک جنس و یا جنس‌های مختلفی باشند [22]. به همین منظور در سال‌های اخیر استفاده از فرایند پیوند سرد پیوندی به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها، فویل‌ها و کامپوزیت‌های لایه‌ای با ابعاد مختلف افزایش یافته است [22].

تاکنون فلزات فوق‌ریزدانه و نانوساختار زیادی با استفاده از روش نورد تجمعی تولید شده و خواص مکانیکی و ریزساختاری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به فلزات سبک منیزیم [38، 39]، آلومینیوم [11، 40-44]، تیتانیوم [45، 46]، منیزیم، و فلزات پرکاربرد مس [30، 47]، [48]، برنج [49] و فولاد [50، 51] اشاره کرد. نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته بر روی فلزات مختلف، حاکی از بهبود خواص مکانیکی مانند افزایش استحکام و میکروسختی سه‌الی چهار برابر است. این فرایند برای فلزات سبک مانند آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم به دلیل افزایش نسبت استحکام به وزن بالا بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است، هرچند فرایند نورد تجمعی برای سایر فلزات نیز استفاده می‌شود. علاوه بر افزایش خواص مکانیکی، گزارش شده است که با استفاده از این روش، مواد فوق‌ریزدانه و نانوساختار با جنس‌های مختلف تولید شده است [2، 8، 30، 41، 44، 49، 51-56]. همچنین با تکامل فرایند نورد تجمعی، نمونه‌های کامپوزیتی پایه فلزی و کامپوزیت‌های تقویت شده با پودرهای سرامیکی با خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب تولید شد [57-65]. در رابطه

² Solid state bonding

¹ Clad Sheet by Rolling

مرحله آماده‌سازی است [68, 69].

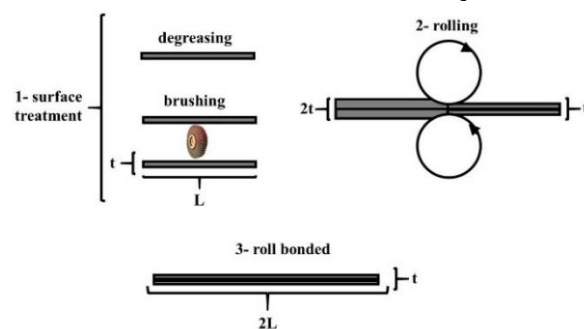


Fig.1 schematic illustration of cold roll bonding process [34, 70]

شکل 1 شماتیک فرایند پیوند سرد نوردی [70, 34]

پیوند سرد نوردی می‌باشد که به منظور اعمال کرنش بالاتر و با توجه به میزان کارپذیری فلز پایه، در چندین سیکل تکرار می‌شود. بنابراین با تکرار فرایند پیوند نوردی (افزایش سیکل‌های فرایند نورد تجمعی، می‌توان کرنش پلاستیکی زیادی به ماده اعمال کرد. بر همین اساس، مطابق با روابط (1) و (2)، میزان کرنش اعمالی معادل، تعداد لایه‌ها، فصل مشترک‌ها و کاهش ضخامت در سیکل‌های مختلف برای ورق اولیه با کاهش ضخامت 50% در هر پاس را به‌دست آورد که در جدول 1 نیز ارائه شده است.

$$\epsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln n \frac{t_0}{t} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln n \frac{1}{1-R} \quad (1)$$

$$m = 2^n \quad (2)$$

در این روابط، n تعداد پاس، t_0 ضخامت اولیه، t ضخامت پس از نورد، R مقدار کاهش ضخامت، ϵ_{eq} کرنش معادل و m تعداد لایه‌ها در هر سیکل می‌باشد.

3- ریزساختار

طبق روابط (1) و (2) و همچنین جدول 1، با افزایش کرنش اعمالی و تکرار مراحل نورد، تعداد فصل مشترک‌های تولیدی به صورت نمایی افزایش و ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش فصل مشترک و کاهش ضخامت لایه‌ها پیوند قوی‌تری بین لایه‌ها تشکیل می‌شود.

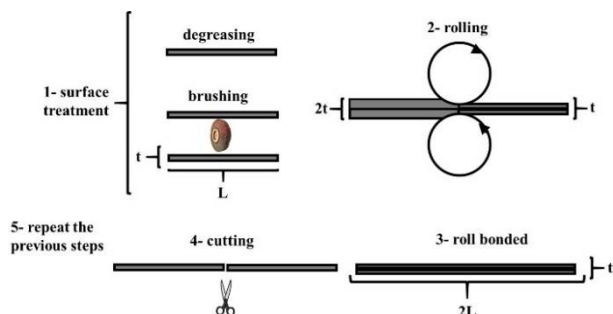


Fig.2 schematic illustration of accumulative roll bonding process [29, 35, 42]

شکل 2 شماتیک فرایند نورد تجمعی [29, 35, 42]

در طول فرایند، کاهش ضخامت بالا (50% یا بیشتر) تحت فشار اعمالی توسط غلتک‌ها به‌دست می‌آید. این کاهش ضخامت باعث تولید حرارت و ایجاد پیوند در لایه‌های در تماس می‌شود. معمولاً، پس از نورد، به منظور افزایش استحکام پیوند، عملیات آنیل انجام می‌شود، زیرا انتظار می‌رود که عملیات آنیل، یک پیوند متالورژیکی قوی در محل اتصال پیوند (لایه‌های در تماس با هم) ایجاد کند.

شکل 2 اصول فرایند نورد تجمعی را نشان می‌دهد. در این روش ابتدا دو ورق با ابعاد کاملاً یکسان، آماده‌سازی سطحی می‌شوند. آماده‌سازی سطحی شامل، شست‌وشوی اولیه نمونه‌ها با آب و صابون، چربی‌زدایی با استفاده از حمام استون، خشک کردن در هوای آزاد، و زبر کردن لایه‌هایی که در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، می‌باشد. پس از عملیات آماده‌سازی سطحی و مکانیکی، دو ورق به‌صورت کامل روی یکدیگر قرار گرفته و نمونه‌ها از چهار طرف سوراخ می‌شوند و به منظور جلوگیری از سر خوردن آن‌ها به وسیله سیم بسته می‌شوند. سپس توسط فرایند نورد، یک کاهش ضخامت بالا (معمولاً 50%) اعمال شده و به یکدیگر متصل می‌شوند. برای ایجاد پیوند مناسب حتی گاهی دما تا زیر دمای تبلور مجدد ماده نیز می‌تواند افزایش یابد. در ادامه، ورق نورد شده، از وسط برش خورده و به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود و دوباره مراحل گفته‌شده تکرار می‌گردند. به بیان دیگر، فرایند نورد تجمعی همان فرایند

Table 1 summarizes the geometrical and equivalent applied strain changes of the sample during the ARB process by 50 % reduction per cycle

جدول 1 خلاصه‌ای از تغییرات هندسی و کرنش اعمالی معادل برای نمونه در فرایند نورد تجمعی با کاهش ضخامت 50% در هر سیکل

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n
m	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2^n
b	1	3	7	15	31	63	127	255	511	1023	$2^n - 1$
R_{total}	50	0/75	87/5	93/8	96/9	98/4	99/2	99/6	99/8	99/9	$(1 - \frac{1}{2^n}) \times 100$

ϵ_{eq}	0/8	1/6	2/4	3/2	4	4/8	5/6	6/4	7/2	8	0.8n
-----------------	-----	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----	-----	---	------

به ریزساختار فوق ریزدانه با یک اندازه دانه اشباع دست یافته‌اند و در نتایج ارائه شده کمترین اندازه میانگین دانه گزارش شده، بیشتر از 250 نانومتر است.

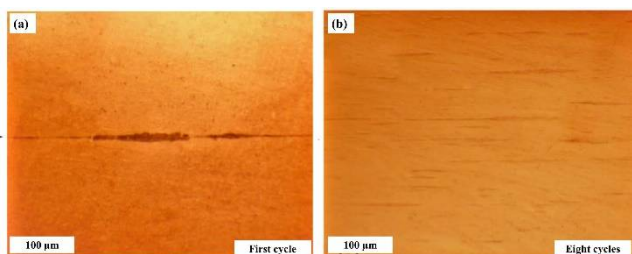


Fig.3 Optical microscopy images of ARBed pure copper at (a) the first cycle and (b) the eight cycles [71]

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از نورد تجمعی مس خالص در (a) سیکل اول و (b) سیکل هشتم [71]

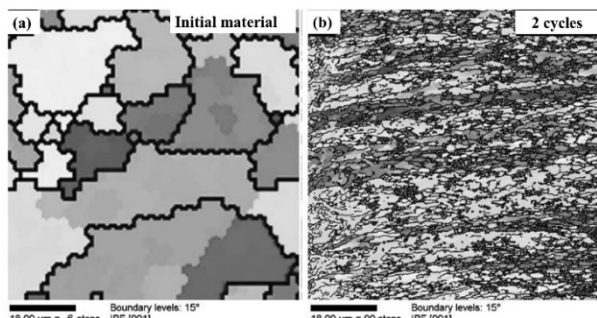


Fig.4 grain structure of the initial material (cast AA8006) and after second ARB cycle [72]

شکل 4 ساختار دانه‌های ماده اولیه (آلومینیوم ریخته‌گری 8006) و پس از دو سیکل فرایند نورد تجمعی [72]

Table 2 the grain size of different materials produced by ARB

مرجع	میانگین اندازه دانه (نانومتر)	سال	ماده
[30]	$100 \leq$	2008	مس خالص
[73]	200	2016	مس خالص
[74]	270	2016	آلومینیوم خالص
[75]	380	2016	آلومینیوم خالص
[49]	$100 \leq$	2010	برنج 30/70
[77]	110	2013	نیکل
[78]	300	2008	فولاد خالص تجاری

در این نوع فلزات، پس از اعمال کرنش مشخص، اشباع چگالی نابه‌جایی اتفاق افتاده و با اعمال کرنش بیشتر نرخ تولید و حذف نابه‌جایی برابر یا کمتر می‌باشد و در نتیجه با افزایش کرنش، نه تنها کاهش اندازه دانه اتفاق نمی‌افتد، بلکه می‌تواند بزرگتر نیز شود. البته در نرخ کرنش‌های بالا علاوه بر اشباع

یکی از دلایل استفاده از فرایند نورد تجمعی نسبت به فرایند پیوند نوردی همین موضوع است که با اعمال کرنش بیشتر و تکرار مراحل نورد، میزان فصل مشترک‌ها افزایش یافته و پیوند به مراتب قوی‌تری نسبت به حالت اول ایجاد می‌شود. در واقع فرایند نورد تجمعی از تکرار پیوندهای ایجاد شده به وسیله پیوند سرد نوردی حاصل می‌شود. در شکل 3، فصل مشترک‌های نمونه-ی مس تولید شده به روش نورد تجمعی در پاس اول و هشتم ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش کرنش اعمالی و تولید فصل مشترک بیشتر، پیوند قوی‌تری بین لایه‌ها ایجاد شده است [71]. در سیکل‌های ابتدایی، ساختار لایه‌ای و جدایش لایه‌ای به‌وضوح مشخص است و با افزایش کرنش اعمالی، ضخامت لایه‌ها کاهش و اثر ساختار لایه‌ای کمتر می‌شود، تا اینکه در سیکل‌های پایانی این ساختار قابل مشاهده نمی‌باشد. همچنین در فرایند نورد تجمعی، تکرار پیوند نوردی باعث بهبود استحکام پیوند در فصل مشترک سیکل‌های بعدی می‌شود. به عنوان مثال فصل مشترک در سیکل اول به صورت واضح در شکل 3(a) مشاهده می‌شود ولی در سیکل‌های بعدی پیوند لایه‌های اولیه بهبود می‌یابد و در سیکل هشتم فصل مشترک‌های پاس‌های قبلی به خصوص سیکل اول قابل تشخیص نمی‌باشد [71، 49].

در شکل 4، ریزساختار نمونه‌ی اولیه (ریخته‌گری) و نورد تجمعی شده آلومینیوم ریخته‌گری شده 8006 در سیکل دوم ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با اعمال کرنش کم (دو پاس)، دانه‌های بسیار ریز و کشیده شده در جهت نورد تشکیل شده است. این کاهش اندازه دانه در همه‌ی نمونه‌های نورد تجمعی مشاهده شده و با توجه به انرژی نقص چیدمان¹ ماده و قابلیت کارپذیری آن می‌توان با اعمال میزان کرنش بیشتر به ساختار ریزدانه و حتی نانوساختار رسید.

در جدول 2 میانگین اندازه دانه برای نمونه‌هایی از جنس‌های مختلف (آلومینیوم، برنج، مس، فولاد و نیکل) که با استفاده از فرایند نورد تجمعی تولید شده، ارائه شده است. با توجه به نتایج گزارش شده در جدول، برای فلزات با انرژی نقص چیدمان کم مانند برنج و مس اندازه دانه با ابعاد نانو، بعد از اعمال کرنش پلاستیک 4/8 و 6/4 در فرایند نورد تجمعی گزارش شده است. در صورتی که محققان برای فلزات با انرژی نقص چیدمان زیاد مانند آلومینیوم خالص و آلایژهای آن حتی با اعمال کرنش بیشتر

¹ Stacking-fault energy (SFE)

دارای مرزهای کوچک زاویه هستند و با افزایش کرنش اعمالی، کسر بیشتری از مرزدانه بزرگ زاویه می‌شود. با افزایش کرنش (سیکل‌های بالاتر) درصد بالاتری از نواحی نمونه فوق ریزدانه می‌شود و ساختاری فوق ریزدانه یکنواخت‌تر حاصل می‌شود [42]، [71، 75]. در شکل 5 میانگین اختلاف زاویه دانه‌ها، درصد مرزدانه‌های کوچک زاویه و بزرگ زاویه برای نمونه‌ی آتیل شده و فوق ریزدانه‌ی آلومینیوم 2024 پس از هشت سیکل فرایند نورد تجمعی ارائه شده است. همان‌طور که اشاره شده با افزایش کرنش اعمالی، درصد بیشتری از مرزدانه‌ها بزرگ زاویه شده و میانگین اختلاف زاویه در مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد [76].

4- خواص مکانیکی

4-1- استحکام کششی

اعمال فرایند نورد تجمعی در دمای محیط باعث افزایش قابل ملاحظه خواص مکانیکی فلزات مختلف نظیر آلومینیوم، مس، منیزیم و غیره است. مطابق با شکل 6، روند تغییرات خواص مکانیکی برای فلزات متفاوت ارائه شده است که این نمودار بیانگر تغییرات کاملاً یکسان برای هر سه فلز است. به‌طور کلی، این اثر به‌دلیل همان ویژگی فرایندهای تغییر شکل شدید پلاستیک است که اجازه اعمال کرنش‌های بالا را به ماده می‌دهد تا در اثر اعمال کرنش دلخواه، خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب حاصل شود.

چگالی نابه‌جایی، بازیابی دینامیکی نیز می‌تواند یکی از عوامل افزایش اندازه دانه باشد. مکانیزم شکل‌گیری ساختار فوق ریزدانه/نانوساختار در فرایندهای تغییر شکل شدید پلاستیک فلزات، تبلور مجدد پیوسته می‌باشد که با تقسیم دانه‌های فرعی درشت دانه به فوق ریزدانه، تشکیل مرزدانه‌های بزرگ زاویه به‌وسیله بازیابی و مهاجرت مرزدانه‌های کوچک زاویه مشخص می‌شود. تغییرات پیوسته در جهت‌گیری نابه‌جایی‌های هندسی منجر به شکل‌گیری مرزهای بزرگ زاویه می‌شود. همچنین کرنش برشی شدید ناشی از اصطکاک بین ورق و غلتک‌های نورد می‌تواند دلیل دیگری برای کاهش اندازه دانه باشد. این تغییر شکل برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش کرنش موثر و ریزدانه شدن می‌شود. از طرف دیگر، کسر زیادی از دانه‌ها در سیکل‌های ابتدایی فرایند نورد تجمعی در جهت نورد کشیده می‌شوند و ریزساختار لایه‌ای را تشکیل می‌دهند. البته با افزایش کرنش اعمالی و تکرار مراحل نورد، تقریباً همه‌ی دانه‌ها هموار شده و در این حالت پخش اندازه دانه‌ها نیز در نواحی مختلف یکسان می‌شود. در فرایند نورد تجمعی با افزایش کرنش اعمالی، اندازه دانه‌ها کوچکتر می‌شود و در کرنش‌های بالا، ماده با ساختار فوق ریزدانه همراه با مرزدانه‌های بزرگ زاویه تشکیل می‌شود. به‌طور کلی، تکامل ریزساختاری در فرایند نورد تجمعی بر اساس افزایش کرنش اعمالی (افزایش سیکل‌های فرایند) در نمونه‌های مختلف در دمای اتاق به ترتیب به شرح زیر است [42، 71، 73، 74].

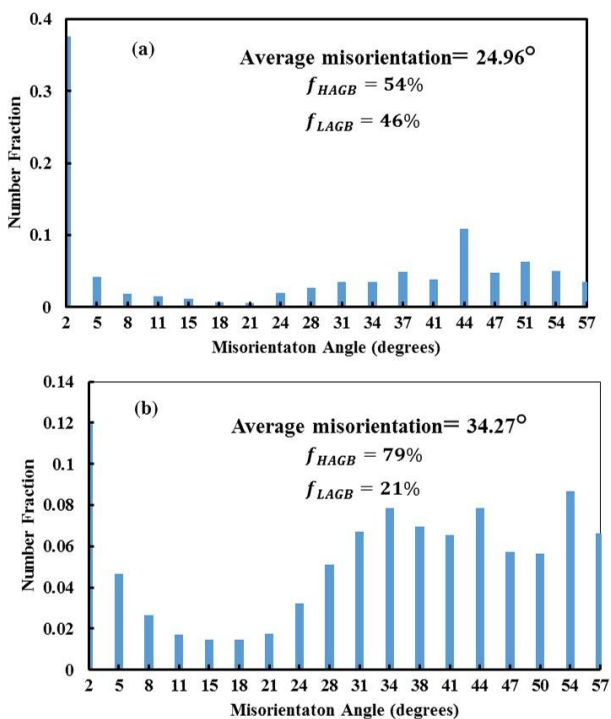


Fig.5 The misorientation angle distribution of the (a) annealed, (b) UFG

- ایجاد سلول‌های نابه‌جایی و دانه‌های فرعی،
 - ریزشدن سلول‌های نابه‌جایی و دانه‌های فرعی به دلیل لغزش چند جهته،
 - افزایش در زاویه مرزدانه‌های کوچک زاویه اولیه،
 - ایجاد ساختار فوق ریزدانه با مرزدانه‌های بزرگ زاویه.
- به‌طور نسبی، سلول‌های نابه‌جایی و دانه‌های فرعی با ابعاد درشت، در سیکل اول فرایند نورد تجمعی به دلیل لغزش چند جهته تشکیل می‌شود. با افزایش کرنش اعمالی، چگالی نابه‌جایی افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی نابه‌جایی، چگالی سلول‌های نابه‌جایی کاهش یافته و این امر باعث کوچک و ریزدانه شدن دانه‌های فرعی و سلول‌های نابه‌جایی می‌شود. با افزایش سیکل‌های فرایند نورد تجمعی، ساختار فوق ریزدانه غالب می‌شود. البته گزارش شده است که این ساختار فوق ریزدانه تشکیل شده در نواحی مختلف در ابتدا ناهمگن و غیریکنواخت است. ساختار فوق ریزدانه در این حالت، شامل دانه‌های فرعی تقسیم شده به وسیله دیوارهای نابه‌جایی می‌باشد. دانه‌های فرعی تشکیل شده در ابتدا

نورد تجمعی اثر آن کاهش می‌یابد و در سیکل‌های پایانی، استحکام بالا به وسیله‌ی بهبود ریزساختار و اصلاح دانه‌ها اتفاق می‌افتد و به‌گونه‌ای مکانیزم ریزدانه شدن، مکانیزم غالب استحکام بخشی می‌شود [2, 3, 11, 43, 49, 76, 80]. بر اساس رابطه هال-پچ شکل‌گیری تدریجی دانه‌های فوق‌ریزدانه نقش اصلی را در افزایش استحکام ایفا می‌کند. در کرنش پلاستیک کم و متوسط، کرنش سختی مکانیزم غالب می‌باشد چون در این حالت به طور عمده، ریزساختار ماده، دارای ساختار با مرزدانه‌های فرعی با زوایای کوچک (3-5 درجه) است. به عبارت دیگر در سیکل‌های ابتدایی مرزدانه‌های کوچک زاویه تشکیل می‌دهند و با افزایش کرنش، زاویه مرزدانه افزایش می‌یابد و فاصله آن‌ها با نرخ‌های مختلف کاهش می‌یابد [76].

در محدوده کرنش متوسط تا زیاد، مرزدانه‌ها به مرزهای بزرگ زاویه تکامل می‌یابند و کسر بیشتری از مرزدانه‌ها، بزرگ زاویه می‌شوند. همچنین با افزایش کرنش اعمالی، درصد بیشتری از دانه‌ها، فوق ریزدانه شده و با افزایش کرنش، روند کاهش اندازه دانه ادامه می‌یابد. بنابراین، استحکام بخشی به‌طور عمده به دلیل اصلاح و ریزدانه شدن است، زیرا تقریباً در سیکل‌های پایانی کسر زیادی از دانه‌ها، فوق‌ریزدانه می‌شوند [76]. یکی دیگر از دلایلی که می‌تواند در افزایش میزان خواص مکانیکی موثر باشد، بهبود اتصال لایه‌ها به خاطر کاهش ضخامت لایه‌ها، افزایش فصل مشترک‌ها و یکنواختی بیشتر در ریزساختار است [2, 3].

4-2- ازدیاد طول

در فرایند نورد تجمعی ورق‌های فلزی میزان شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌ی اولیه که دارای توان کارسختی و شکل‌پذیری بالا می‌باشد به مراتب کمتر است. در شکل 7 تغییرات ازدیاد طول ناشی از آزمون کشش تک‌محوره در سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی برای مواد مختلف ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات ازدیاد طول برای مواد مختلف کاملاً یکسان می‌باشد و با اعمال یک پاس نورد تجمعی، میزان ازدیاد طول به شدت کاهش می‌یابد و پس از آن با اعمال کرنش بیشتر مقدار ازدیاد طول کاهش نمی‌یابد و با نرخ بسیار کم افزایش یافته یا تغییر آن‌چنانی مشاهده نمی‌شود. دلیل تغییرات ایجاد شده در مقدار ازدیاد طول همان مکانیزم‌های حاکم بر تغییرات استحکام کششی است که در کرنش کم، کرنش سختی و افزایش چگالی نابه‌جایی باعث افت شدید در شکل‌پذیری می‌شود. با افزایش کرنش، به تدریج اثر کرنش سختی کاهش یافته و کسر بیشتری از ریزساختار ماده فوق ریزدانه می‌شود. همچنین

Al2024 produced by ARB process [76]

شکل 5 پخش اختلاف زاویه در دانه‌ها برای نمونه‌ی آنیل شده و فوق ریزدانه تولید شده با فرایند روش نورد تجمعی [76]

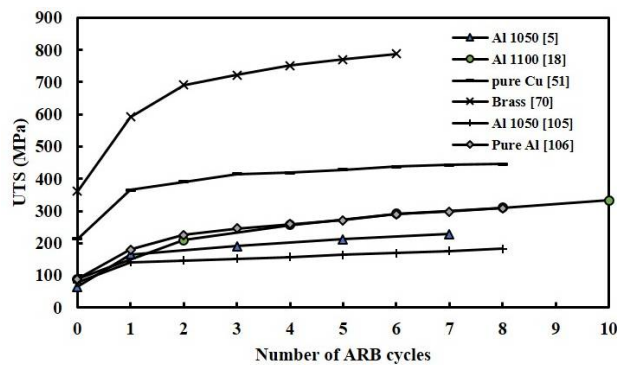


Fig.6 Variation of tensile strength of different samples during cycles of ARB process [3, 7, 30, 49, 75, 79]

شکل 6 تغییرات استحکام کششی در سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی برای نمونه‌های مختلف [3, 7, 30, 49, 75, 79]

محققان، در همه‌ی پژوهش‌های پیشین در زمینه بررسی اثر فرایند نورد تجمعی بر خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده، گزارش کرده‌اند که میزان استحکام کششی به‌صورت پیوسته و با اعمال کرنش افزایش یافته است [3, 7, 30, 41, 49, 75, 79]. همچنین گزارش شده است که با اعمال کرنش در همان پاس اول فرایند نورد تجمعی، مقدار استحکام کششی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته است. البته این میزان افزایش در مواد مختلف متفاوت بوده و در حالت کلی به میزان کارپذیری نمونه‌ی اولیه و کاهش ضخامت اعمالی وابسته است. پس از سیکل اول فرایند و با افزایش میزان کرنش اعمالی، میزان استحکام کششی ماده نیز به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین نرخ افزایش استحکام با افزایش اعمال کرنش، کاهش می‌یابد. مکانیزم‌ها و پارامترهای موثری باعث ایجاد این تغییر خواص مکانیکی در حین فرایند نورد تجمعی می‌شود و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند. به طور کلی، خواص مکانیکی فلزات را می‌توان با چهار مکانیزم مختلف تقویت کرد، که این چهار مکانیزم، فوق ریزدانه کردن ساختار، کرنش سختی، رسوب سختی و استفاده از روش محلول جامد می‌باشد [76]. مشارکت هر مکانیزم به عواملی مثل توان کارسختی و پیرسختی، میزان تغییر شکل و ترکیب آلیاژ وابسته است [76]. در فرایند نورد تجمعی مواد فلزی خالص، دو مکانیزم اصلاح دانه (فوق ریزدانه کردن) و کرنش سختی حاکم است. در سیکل‌های ابتدایی فرایند نورد تجمعی، مکانیزم کارسختی و افزایش چگالی نابه‌جایی حاکم است. با افزایش سیکل‌های فرایند

اشباع می‌رسد [15].

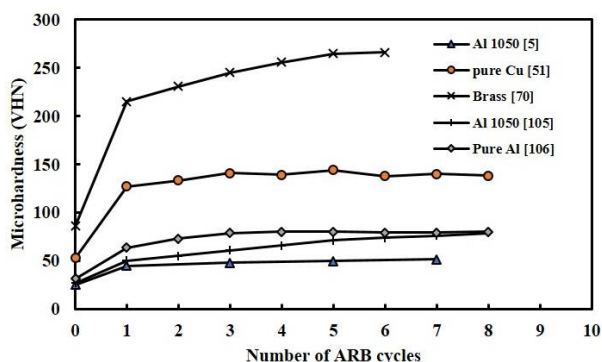


Fig.8 variation of microhardness of different samples during cycles of ARB process [3, 7, 30, 49, 75, 79]

شکل 8 تغییرات میکروسختی ویکرز در سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی برای نمونه‌های مختلف [3, 7, 30, 49, 75, 79]

انجام آزمون میکروسختی در راستای ضخامت برای نمونه‌های تولید شده به روش نورد تجمعی نشان می‌دهد که میزان میکروسختی ویکرز برای هر لایه در راستای ضخامت یکسان نیست و تقریباً در همه نمونه‌ها در سطوح و مرکز لایه‌ها، مقدار میکروسختی بیشتری است [40, 71, 84]. عامل اصلی این اختلاف سختی، وجود گرادپان کرنش اعمالی در راستای ضخامت به دلیل وجود اصطکاک بین غلطک‌های نورد و سطح نمونه و همچنین کارسختی بیشتر لایه‌ها در عملیات آماده‌سازی مکانیکی (خراشیدن با برس خورشیدی) است [40, 71]. وجود اصطکاک بین غلطک و سطح نیز باعث ایجاد کرنش برشی می‌شود [40, 84].

4-4- سوپرپلاستیسیته

خواص مکانیکی فلزات بسیار حساس به تغییرات اندازه دانه است و تغییرات دمایی باعث ایجاد تغییرات قابل توجه در اندازه و شکل دانه می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، طبق رابطه هال-پتچ، کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی از طریق مکانیزم استحکام بخشی مرزدانه‌ها می‌شود و از طرفی هم کاهش اندازه دانه باعث افزایش شرایط سوپرپلاستیسیته می‌شود [85, 86]. سوپرپلاستیسیته با افزایش شکل‌پذیری و کاهش استحکام تسلیم همراه است و یکی از راه‌های شکل‌پذیری قطعات با هندسه پیچیده، استحکام بالا و یا شکل‌پذیری محدود در دمای محیط است [87]. مکانیزم اصلی در فرایندهای شکل‌دهی سوپرپلاستیک تغییر مکانیزم لغزش مرزدانه‌ها به جای لغزش صفحات اتمی در دمای بالاست و با افزایش چگالی مرزدانه‌ها شرایط سوپرپلاستیک تسهیل می‌شود

کرنش‌های بالا درصد مرزهای بزرگ زاویه افزایش یافته و سبب افزایش همزمان استحکام و ازدیاد طول با افزایش کرنش می‌شود [2, 3, 12, 29, 40, 42, 75, 76, 80].

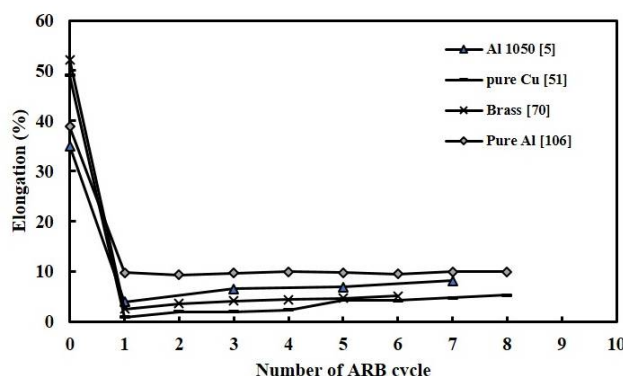


Fig.7 Variation of elongation of different samples during cycles of ARB process [3, 7, 30, 49, 79]

شکل 7 تغییرات ازدیاد طول در سیکل‌های مختلف فرایند نورد تجمعی برای نمونه‌های مختلف [3, 7, 30, 49, 79]

4-3- میکروسختی ویکرز

تغییرات میکروسختی ویکرز در شکل 8 برای مواد مختلف مشاهده می‌شود. در نگاه کلی کاملاً مشخص است که روند تغییرات در مقدار میکروسختی در حین پاس‌های مختلف فرایند نورد تجمعی تقریباً یکسان است. پس از سیکل اول، افزایش قابل ملاحظه‌ای در میکروسختی ویکرز مشاهده می‌شود که معمولاً این افزایش می‌تواند حتی بیش از دو برابر مواد اولیه نیز باشد. در فرایند نورد تجمعی، پس از یک افزایش شدید، با افزایش کرنش اعمالی، نرخ افزایش میکروسختی کاهش می‌یابد. گزارش شده است که افزایش مقدار میکروسختی در کرنش اعمالی کم (پاس اول) مرتبط با کرنش سختی، شکل‌گیری مرزهای فرعی¹ یا سلول‌های نابه‌جایی² است [75]. پس از یک افزایش شدید در سیکل‌های ابتدایی، با افزایش کرنش اعمالی نرخ افزایش میکروسختی کاهش می‌یابد. افزایش قابل ملاحظه میکروسختی در سیکل‌های ابتدایی به کرنش سختی مرتبط (چگالی نابه‌جایی و واکنش آن‌ها) است. معمولاً در سیکل‌های خیلی بالا (کرنش زیاد)، مقدار میکروسختی اشباع می‌شود. این اشباع به دلیل پایداری در چگالی نابه‌جایی می‌باشد. این حالت به خاطر توازن و برابری در تولید نابه‌جایی با تغییر شکل پلاستیک و حذف نابه‌جایی‌ها با تبلور مجدد پیوسته و بازیابی دینامیکی است [71, 73, 79, 81-83]. بنابراین در کرنش‌های بالا، نرخ تولید و حذف نابه‌جایی‌ها تقریباً برابر می‌شود و مقدار میکروسختی به حالت

¹ Subgrains

² Dislocation cells

در راستای جهت کشش رخ می‌دهد [30, 35, 90, 91].

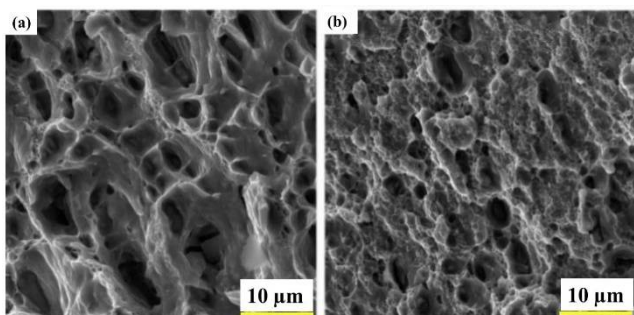


Fig. 9 SEM images fracture surfaces after tensile test after (a) annealed Al and (b) ARB specimen processed to six cycles [89]

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست پس از آزمون کشش برای نمونه‌ی آنیل آلومینیوم و نمونه‌ی نورد تجمعی شده در شش سیکل [89]

البته در فلزات با چقرمگی بالا اندازه ترک‌ها و حفرات بسیار بزرگتر می‌باشد و خود این حفرات با بزرگتر شدن آنها موجب شکست می‌شوند ولی در سایر موارد از پیوستگی میکرو حفرات، ترک‌ها ایجاد و گسترش می‌یابند. اما مکانیزم شکست ترد کاملاً با موارد بالا متفاوت است و شکست ترد بدون تشکیل میکرو حفرات و تغییر شکل در سطح شکست ایجاد می‌شود و سطح شکست ترد کامل صاف است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند نورد تجمعی حفرات کم‌عمق تر و کوچک تر شده‌اند. بر اساس تحقیقات پیشین، وجود دی‌مپل‌های کم‌عمق تر و کوچک‌تر در نمونه‌های چندلایه فلزی تولید شده به روش نورد تجمعی نشان می‌دهد که نوع شکست نرم برشی است. شکست نرم برشی، 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 پایین‌تر بودن ازدیاد طول در ورق‌های نورد تجمعی شده نسبت به ورق‌های اولیه را نشان می‌دهد [91]. در تصاویر دی‌مپل‌های هم‌محور و کوچک مشاهده می‌شود. به سبب تنش‌های نابرابر در سه جهت بعضی دی‌مپل‌ها در یک یا چند جهت کشیده شده‌اند که این مشاهدات از خصوصیات شکست نرم هستند. هر دی‌مپل نماینده‌ی یک مکان جوانه‌زنی ترک است که به فرایند تغییر شکل پلاستیک نسبت داده شده است [92]. در نمونه‌های تولید شده به روش نورد تجمعی در مقایسه با نمونه‌ی آنیل شده اولیه، حفرات و دی‌مپل‌های موجود، با افزایش سیکل‌های این فرایند، کوچکتر و کم‌عمق‌تر می‌شوند که این امر علاوه بر تغییر مکانیزم شکست باعث تغییر در خواص مکانیکی می‌شود. همچنین مکانیزم شکست از شکست نرم برای نمونه‌ی آنیل شده اولیه به شکست نرم برشی برای نمونه‌ی نورد تجمعی شده تغییر می‌کند.

[87, 88]. شرایط فرایندهای شکل‌دهی سوپرپلاستیک اعم از دمای بالا (بالاتر از دمای تبلور مجدد ماده)، نرخ کرنش پایین (کمتر از 1000 بر ثانیه) و اندازه دانه کوچک (کمتر از 1 میکرومتر) باعث محدودیت در ماده استفاده شده، افزایش هزینه و کاهش نرخ تولید در این فرایندها شده است [87]. کاهش اندازه دانه (افزایش مرزدانه‌ها) فعال شدن مکانیزم چرخش و لغزش دانه‌ها در دمای بالا را افزایش می‌دهد و به نوعی مهم‌ترین پارامتر در فرایندهای شکل‌دهی سوپرپلاستیک است [86]. با کاهش اندازه دانه شرایط استفاده از خاصیت سوپرپلاستیک افزایش می‌یابد، زیرا علاوه بر اینکه لغزش مرزدانه‌ها راحت‌تر اتفاق می‌افتد می‌تواند با استفاده از دماهای پایین‌تر و نرخ کرنش بالاتر، نرخ تولید را افزایش و هزینه‌های ناشی از دمای بالا را کاهش داد [86, 87]. فرایند نورد تجمعی، یکی از فرایندهای بسیار موثر در جهت کاهش اندازه دانه و شکل‌دهی در دمای بالا به شمار می‌آید [86].

4-5- شکست‌نگاری

در حالت کلی دو نوع مکانیزم شکست نرم و ترد برای فلزات وجود دارد که با توجه به ساختار کریستالی فلزات می‌توانند شکست نرم یا ترد از خود نشان دهند. در فرایند نورد تجمعی، بررسی سطح مقطع شکست بیشتر برای فلزاتی که دارای شکست نرم هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. فلزات با ساختار کریستالی هگزاگونال دارای شکست ترد هستند و این مکانیزم شکست در فرایند نورد تجمعی نیز حاکم است. اما برای شکست نرم، دو مکانیزم حاکم است؛ که این دو عامل در موقعیت‌های مختلف برای ایجاد شکست نرم با یکدیگر مشارکت دارند. در حالت اول برای شکست نرم، در نزدیکی محل شکست به علت تنش‌های اعمال شده حفرات و میکرو حفرات ایجاد شده و با افزایش تنش رشد می‌کنند. اما در حالت دوم، گسیختگی و شکست توسط برش داخلی میان حفرات رخ می‌دهد که در آن تغییر شکل برشی ساده حکم فرما است [30, 35]. در شکل 9 سطح مقطع شکست ورق اولیه با ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار (آلومینیوم 7075) و پاس ششم فرایند نورد تجمعی (کرنش پلاستیک 4/8) نمایش داده شده است [89]. 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 دی‌مپل‌های هم‌محور یا نیم‌کره‌ای ظاهر می‌شود. این نوع شکست با تشکیل میکرو حفرات، پیوستگی، انتشار ترک یا شکست برشی در زاویه‌ای نسبتاً

افزایش می‌یابد که این امر باعث کاهش ضخامت لایه‌ها و تبدیل مکانیزم خراشان¹ به مکانیزم لایه-لایه‌ای شدن² می‌شود و با این تغییر مکانیزم، نرخ سایش افزایش می‌یابد [97]. همچنین در رابطه با کاهش مقاومت رسانایی و حرارتی، با افزایش کرنش اعمالی، تعداد مرزدانه‌ها و نابه‌جایی‌ها به شدت افزایش یافته که باعث کندی در حرکت الکترون‌های آزاد شده می‌شود و از این طریق رسانایی حرارتی و الکتریکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی اثر فرایند نورد تجمعی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌های فوق‌ریزدانه و نانوساختار تولید شده پرداخته شد و مهمترین نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- فرایند نورد تجمعی روشی ساده، کاربردی و کم‌هزینه برای تولید فلزات نانوساختار و فوق‌ریزدانه با خواص مکانیکی بسیار مطلوب است که می‌تواند برای طیف وسیعی از فلزات استفاده شود. همچنین این روش به دلیل پیوسته بودن، عدم محدودیت ابعاد قطعات تولیدی، مقرون به صرفه بودن هزینه‌ها، خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب قابلیت صنعتی شدن را داراست و می‌تواند در صنایع مختلف نظیر هوافضا، نظامی، کشتی‌سازی، حمل و نقل و غیره به کار گرفته شود که این هدف مستلزم تکمیل شدن فاز تحقیقاتی و شناسایی همه‌ی خواص و پارامترهای نمونه‌های تولید شده به این روش است. البته تاکنون مستندات در ارتباط با استفاده از نمونه‌های تولید شده به روش نورد تجمعی در مراکز و صنایع مختلف گزارش نشده است.

- در فرایند نورد تجمعی با افزایش کرنش اعمالی، میانگین اندازه دانه کاهش می‌یابد که براساس کرنش اعمالی و انرژی نقص در چینش ماده (توان کارسختی) می‌توان به دانه‌های کوچکتر دست یافت، به طوری که در فلزاتی مانند فولاد، برنج و مس دستیابی به اندازه دانه کمتر از صد نانومتر هم اندازه‌گیری شده است. همچنین با افزایش کرنش اعمالی، کسر حجمی مرزدانه‌های بزرگ زاویه افزایش می‌یابد، که این کار دستیابی به خواص مکانیکی به ویژه شکل‌پذیری بالاتر در سیکل‌های پایانی فرایند نورد تجمعی را فراهم می‌کند.

- استحکام کششی و میکروسختی در حین فرایند نورد تجمعی برحسب کرنش اعمالی به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. افزایش استحکام و میکروسختی به‌طور معمول برای فلزات با توان کارسختی پایین (فوق‌ریزدانه)، بیش از 3 برابر و برای فلزات

به صورت خلاصه می‌توان گفت قبل از فرایند 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. پس از انجام فرایند نورد تجمعی و با افزایش گذرهای فرایند 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 است [90، 93-95].

4-6- چقرمگی شکست، سایش و خوردگی

یکی از پارامترهای مهم و قابل اندازه‌گیری مقاومت ماده دارای ترک به رشد ترک یا همان چقرمگی شکست است. پارامتر چقرمگی شکست برای مواد با شکست نرم که در آن رشد ترک به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد قابل اندازه‌گیری است [96]. همچنین به دلیل وابستگی این پارامتر به استحکام و شکل‌پذیری، نرخ تغییرات چقرمگی شکست برای آلومینیوم تولید شده به روش نورد تجمعی مشابه تغییرات استحکام کششی نهایی است [3]. البته اندازه دانه نیز بر مکانیزم‌های رشد ترک از قبیل رشد ترک درون دانه‌ای یا مرزدانه‌ای بسیار اثرگذار خواهد بود. یکی دیگر از پارامترهای مهم در بررسی شکست نمونه‌های تولید شده به روش نورد تجمعی، تغییر شکل پلاستیک و هندسه دهانه ترک است، هرچند تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام نشده و نیازمند بررسی بیشتر و دقیق‌تر است.

یکی از محدودیت‌های فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید و نورد تجمعی، کاهش مقاومت شیمیایی ماده با کاهش اندازه دانه است. با افزایش کرنش اعمالی عیوب کریستالی شبکه مانند نابه‌جایی و مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش و تجمع نابه‌جایی‌ها و مرزدانه‌ها از طرفی با ایجاد مانع بر سر حرکت نابه‌جایی‌ها و قفل شدن آن‌ها، باعث افزایش استحکام کششی و سختی می‌شود و از طرفی هم باعث کاهش برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی مانند هدایت الکتریکی، حرارتی و مقاومت به سایش و خوردگی خواهد شد. تجمع نابه‌جایی‌ها و وجود مرزدانه‌ها با انرژی زیاد، مکان مناسب برای نفوذ و انجام واکنش‌های شیمیایی است و با افزایش کرنش اعمالی (تعداد سیکل‌های فرایند نورد تجمعی) تمایل برای نفوذ افزایش خواهد یافت [71]. همچنین در برخی موارد افزایش بیش از حد سختی سطح باعث افزایش مقاومت به سایش در سیکل‌های ابتدایی نسبت به نمونه‌ی اولیه شده است، هرچند با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند نورد تجمعی، تعداد لایه‌ها به صورت نمایی

¹ Abrasion

² delamination

- process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 708, pp. 301-310, 2017.
- [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] G. Faraji, H. Kim, Review of principles and methods of severe plastic deformation for producing ultrafine-grained tubes, *Materials Science and Technology*, Vol. 33, No. 8, pp. 905-923, 2017.
- [6] S. Amani, G. Faraji, K. Abrinia, Microstructure and hardness inhomogeneity of fine-grained AM60 magnesium alloy subjected to cyclic expansion extrusion (CEE), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 28, pp. 197-208, 2017.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] M. Eskandarzade, A. Masoumi, G. Faraji, M. Mohammadpour, X. S. Yan, A new designed incremental high pressure torsion process for producing long nanostructured rod samples, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 695, pp. 1539-1546, 2017.
- [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] G. Faraji, M. M. Mashhadi, H. S. Kim, Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Materials Letters*, Vol. 65, No. 19-20, pp. 3009-3012, 2011.
- [15] G. Faraji, P. Yavari, S. Aghdamifar, M. M. Mashhadi, Mechanical and microstructural properties of ultra-fine grained az91 magnesium alloy tubes processed via multi pass tubular channel angular pressing (tcap), *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 134-138, 2014.
- [16] L. Li, K. Nagai, F. Yin, Progress in cold roll تولیدی نانوساختار (فلزات با کارپذیر بالا) تا 6 برابر نمونه‌ی اولیه نیز مشاهده شده است. همچنین میزان افزایش استحکام و میکروسختی در سیکل‌های ابتدایی بیشتر و با افزایش کرنش عملی به تدریج نرخ افزایش کاسته می‌شود.
- در فرایند نورد تجمعی، دو مکانیزم بهبود ریزساختار (کاهش اندازه دانه و افزایش مرزدانه‌ها) و افزایش چگالی نابه‌جایی ناشی از کارسرد نقش اصلی تغییرات خواص مکانیکی و ریزساختاری را ایفا می‌کنند. در سیکل‌های ابتدایی فرایند نورد تجمعی، کارسرد مکانیزم اصلی در افزایش استحکام و سختی است و با افزایش کرنش عملی اثر آن کاسته شده و مکانیزم ریزدانه شدن جایگزین آن می‌شود در سیکل‌های پایانی با شکل‌گیری دانه‌های کوچک با مرزدانه‌های بزرگ باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شوند.
- افزایش چگالی نابه‌جایی و مرزدانه‌ها باعث افزایش عیوب خطی و صفحه‌ای در شبکه کریستالی شده که این عامل باعث کاهش مقاومت به خوردگی، سایش و کاهش هدایت الکتریکی و حرارتی در مواد تولید شده به روش نورد تجمعی می‌شود. یکی دیگر از مشکلات فرایند نورد تجمعی که در سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید نیز وجود دارد، عدم کرنش عملی یکنواخت در راستای ضخامت است. در فرایند نورد تجمعی به دلیل اصطکاک بین غلطک‌ها و سطوح ورق و همچنین عملیات آماده‌سازی مکانیکی (خراشیدن با سنباده)، مرکز و سطح نمونه‌ها کرنش بیشتری را متحمل می‌شوند که باعث ناهمگن شدن خواص در راستای ضخامت می‌شود.
- در فلزات فوق‌ریزدانه حساسیت به تغییرات دما افزایش می‌یابد و در محدوده مشخص باعث تغییر مکانیزم لغزش مرزدانه‌ها به جای لغزش صفحات اتمی می‌شود که این عامل باعث بهبود شکل‌دهی سوپرپلاستیک در دمای بالا می‌شود.

6- مراجع

- [1] G. Faraji, M. M. Mashhadi, H. S. Kim, Microstructural evolution of UFG magnesium alloy produced by accumulative back extrusion (ABE), *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, No. 3, pp. 267-272, 2012.
- [2] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental evaluation of forming limit diagram and mechanical properties of nano/ultra-fine grained aluminum strips fabricated by accumulative roll bonding, *International Journal of Materials Research*, 2017.
- [3] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaee, Experimental evaluation of the plane stress fracture toughness for ultra-fine grained aluminum specimens prepared by accumulative roll bonding

- [31] M. Eizadjou, A. K. Talachi, H. D. Manesh, H. S. Shahabi, K. Janghorban, 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. 2003-2009, 2008.
- [32] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, Investigation of mechanical properties, fractography and microstructure of layered Al/Cu composite produced by cold roll bonding, 2017.
- [33] D. Rahmatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. Shojaee, Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 166-174, 2017.
- [34] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of formability of aluminum sheets produced by cold roll bonding process used by Nakazima test, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 451-454, 2017.
- [35] 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.
- [36] D. Yang, P. Cizek, P. Hodgson, C. e. Wen, Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding, *Scripta materialia*, Vol. 62, No. 5, pp. 321-324, 2010.
- [37] K. Wu, H. Chang, E. Maawad, W. Gan, H. Brokmeier, M. Zheng, 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] X. Huang, N. Tsuji, N. Hansen, Y. Minamino, bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2016.
- [17] D. Milner, L. VAIDYANATH, Significance of surface preparation in cold pressure welding, *MET CONSTR BR WELD J*, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.
- [18] J. Yong, P. Dashu, L. Dong, L. Luoxing, Analysis of clad sheet bonding by cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 32-37, 2000.
- [19] A. Yahiro, T. Masui, T. Yoshida, D. Doi, 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.
- [20] H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, Cold roll bonding of 5754-aluminum strips, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002.
- [21] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, 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.
- [22] 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.
- [23] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2320-2326, 2010.
- [24] M. Eizadjou, H. D. Manesh, K. Janghorban, Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008.
- [25] H. D. Manesh, A. K. Taheri, The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet, *Materials & design*, Vol. 24, No. 8, pp. 617-622, 2003.
- [26] M. Movahedi, H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, 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.
- [27] M. Abbasi, M. R. Toroghinejad, 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.
- [28] M. Alizadeh, M. Paydar, Study on the effect of presence of TiH₂ particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-86, 2009.
- [29] N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Tanigawa, Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 795-800, 3/5/, 1999.
- [30] M. Shaarbaaf, 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.

- plastic deformation at cryogenic temperature, *Journal of materials science*, Vol. 39, No. 8, pp. 2851-2854, 2004.
- [56] S. J. Yoo, S. H. Han, W. J. Kim, Magnesium matrix composites fabricated by using accumulative roll bonding of magnesium sheets coated with carbon-nanotube-containing aluminum powders, *Scripta Materialia*, Vol. 67, No. 2, pp. 129-132, 7//, 2012.
- [57] A. Ahmadi, M. R. Toroghinejad, A. Najafzadeh, Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al/Al₂O₃/SiC hybrid composite fabricated by accumulative roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 13-19, 1//, 2014.
- [58] H. Akbari beni, M. Alizadeh, M. Ghaffari, R. Amini, Investigation of grain refinement in Al/Al₂O₃/B₄C nano-composite produced by ARB, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 438-442, 3//, 2014.
- [59] M. Alizadeh, Processing of Al/B₄C composites by cross-roll accumulative roll bonding, *Materials Letters*, Vol. 64, No. 23, pp. 2641-2643, 12/15/, 2010.
- [60] M. R. K. Ardakani, S. Amir Khanlou, S. Khorsand, Cross accumulative roll bonding—A novel mechanical technique for significant improvement of stir-cast Al/Al₂O₃ nanocomposite properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 591, pp. 144-149, 1/3/, 2014.
- [61] H. Jafarian, J. Habibi-Livar, S. H. Razavi, Microstructure evolution and mechanical properties in ultrafine grained Al/TiC composite fabricated by accumulative roll bonding, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 77, pp. 84-92, 2015.
- [62] R. Jamaati, M. Reza Toroghinejad, H. Edris, Fabrication of nanoparticle strengthened IF steel via ARB process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 583, pp. 20-24, 10/20/, 2013.
- [63] M. Tayyebi, B. Eghbali, Microstructure and mechanical properties of SiC-particle-strengthening tri-metal Al/Cu/Ni composite produced by accumulative roll bonding process, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 357-364, March 01, 2018.
- [64] 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.
- [65] m. tayyebi, D. Rahmatabadi, r. rashidi, R. Hashemi, Evaluation of mechanical properties and microstructure for Al/Ni %5 produced by cross accumulative roll bonding process, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 2, pp. 279-288, 2018.
- [66] J. Nie, M. Liu, F. Wang, Y. Zhao, Y. Li, Y. Cao, Y. Zhu, Fabrication of Al/Mg/Al composites via accumulative roll bonding and their mechanical properties, *Materials*, Vol. 9, No. 11, pp. 951, 2016.
- [67] Y. Wang, G. Luo, J. Zhang, Q. Shen, L. Zhang, Microstructure of Diffusion-Bonded Mg-Ag-Al Microstructural evolution during accumulative roll-bonding of commercial purity aluminum, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 340, No. 1, pp. 265-271, 2003.
- [44] M. R. Rezaei, M. R. Toroghinejad, F. Ashrafzadeh, 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] L. Mishnaevsky Jr, E. Levashov, R. Z. Valiev, J. Segurado, I. Sabirov, N. Enikeev, S. Prokoshkin, A. V. Solov'yov, A. Korotitskiy, E. Gutmanas, I. Gotman, E. Rabkin, S. Psakh'e, L. Dluhoš, M. Seefeldt, A. Smolin, Nanostructured titanium-based materials for medical implants: Modeling and development, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 81, pp. 1-19, 7//, 2014.
- [53] S. Pasebani, M. R. Toroghinejad, M. Hosseini, J. Szpunar, Textural evolution of nano-grained 70/30 brass produced by accumulative roll-bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 7-8, pp. 2050-2056, 3/25/, 2010.
- [54] N. Tsuji, 2 - *Bulk nanostructured metals and alloys produced by accumulative roll-bonding* A2 - Whang, Sung H, in: *Nanostructured Metals and Alloys*, Eds., pp. 40-58: Woodhead Publishing, 2011.
- [55] J. Yin, J. Lu, H. Ma, P. Zhang, Nanostructural formation of fine grained aluminum alloy by severe

- fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 474, No. 1–2, pp. 406–415, 4/17/, 2009.
- [80] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito, Y. Minamino, Strength and ductility of ultrafine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing, *Scripta materialia*, Vol. 47, No. 12, pp. 893–899, 2002.
- [81] O. Ghaderi, M. R. Toroghinejad, A. Najafzadeh, Investigation of microstructure and mechanical properties of Cu–SiCP composite produced by continual annealing and roll-bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 565, pp. 243–249, 3/10/, 2013.
- [82] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Effect of stacking fault energy on mechanical properties of nanostructured FCC materials processed by the ARB process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 606, pp. 443–450, 6/12/, 2014.
- [83] S. Ghafari-Gousheh, S. Hossein Nedjad, J. Khalil-Allafi, Tensile properties and interfacial bonding of multi-layered, high-purity titanium strips fabricated by ARB process, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 51, pp. 147–153, 11//, 2015.
- [84] M. tayyebi, D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Review of mechanical and microstructural properties of aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles produced by SPD processes, *Journal of Science and Technology of Composites*, pp. -, 2018.
- [85] E. Hall, The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, Vol. 64, No. 9, pp. 747, 1951.
- [86] P. Hidalgo-Manrique, A. Orozco-Caballero, C. M. Cepeda-Jiménez, O. A. Ruano, F. Carreño, Influence of the Accumulative Roll Bonding Process Severity on the Microstructure and Superplastic Behaviour of 7075 Al Alloy, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 32, No. 8, pp. 774–782, 8//, 2016.
- [87] A. K. Mukherjee, Deformation mechanisms in superplasticity, *Annual review of materials science*, Vol. 9, No. 1, pp. 191–217, 1979.
- [88] W. Backofen, Superplasticity in an Al-Zn alloy, *Trans. ASM*, Vol. 57, pp. 980–990, 1964.
- [89] H. Alvandi, K. Farmanesh, Microstructural and Mechanical Properties of Nano/Ultra-fine Structured 7075 Aluminum Alloy by Accumulative Roll-Bonding Process, *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 17–23, 2015/01/01/, 2015.
- [90] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, G. Faraji, Microstructure and mechanical properties of Al/Cu/Mg laminated composite sheets produced by the ARB proces, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 564–572, 2018.
- [91] 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, pp. 3952–3960, 2015.
- Multilayer Composite Materials, in *Proceeding of*, IOP Publishing, pp. 012023.
- [68] A. Sheikhi, D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, Experimental evaluation of fracture toughness for multi-layered Al/Cu/Mg composite produced by Cold Roll Bonding process, *Sharif Journal of Civil Engineering*, pp. -, 2019.
- [69] D. Rahmatabadi, A. Shahmirzaloo, M. Farahani, R. Hashemi, Characterization of the Plastic and Elastic Properties of Aluminum Sheet Produced by CRB Process via DIC Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 505–513, 2019. eng
- [70] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaee, Experiment investigation of plane stress fracture toughness for aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 101–108, 2017.
- [71] S. A. Hosseini, H. D. Manesh, High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 2911–2918, 9//, 2009.
- [72] M. Karlík, P. Homola, M. Slámová, Accumulative roll-bonding: first experience with a twin-roll cast AA8006 alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 378, No. 1–2, pp. 322–325, 9/22/, 2004.
- [73] A. Fattah-alhosseini, O. Imantalab, Y. Mazaheri, M. K. Keshavarz, Microstructural evolution, mechanical properties, and strain hardening behavior of ultrafine grained commercial pure copper during the accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 650, pp. 8–14, 1/5/, 2016.
- [74] S. O. Gashti, A. Fattah-alhosseini, Y. Mazaheri, M. K. Keshavarz, Effects of grain size and dislocation density on strain hardening behavior of ultrafine grained AA1050 processed by accumulative roll bonding, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 658, pp. 854–861, 2/15/, 2016.
- [75] M. Naseri, M. Reihanian, E. Borhani, Effect of strain path on microstructure, deformation texture and mechanical properties of nano/ultrafine grained AA1050 processed by accumulative roll bonding (ARB), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 673, pp. 288–298, 9/15/, 2016.
- [76] M. Naseri, M. Reihanian, E. Borhani, A new strategy to simultaneous increase in the strength and ductility of AA2024 alloy via accumulative roll bonding (ARB), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 656, pp. 12–20, 2/22/, 2016.
- [77] Y. B. Zhang, O. V. Mishin, N. Kamikawa, A. Godfrey, W. Liu, Q. Liu, Microstructure and mechanical properties of nickel processed by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 576, pp. 160–166, 8/1/, 2013.
- [78] S. Tamimi, M. Ketabchi, N. Parvin, Microstructural evolution and mechanical properties of accumulative roll bonded interstitial free steel, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2556–2562, 8//, 2009.
- [79] M. Eizadjou, H. D. Manesh, K. Janghorban, Microstructure and mechanical properties of ultra-

- [95] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, G. Faraji, 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, pp. 144-153, July 01, 2018.
- [96] D. Rahmatabadi, M. Pahlavani, A. Bayati, R. Hashemi, J. Marzbanrad, Evaluation of fracture toughness and rupture energy absorption capacity of as-rolled LZ71 and LZ91 Mg alloy sheet, *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 3, 2019.
- [97] A. K. Talachi, M. Eizadjou, H. D. Manesh, K. Janghorban, Wear characteristics of severely deformed aluminum sheets by accumulative roll bonding (ARB) process, *Materials Characterization*, Vol. 62, No. 1, pp. 12-21, 1//, 2011.
- [92] M. Reihanian, F. K. Hadadian, M. Paydar, Fabrication of Al–2vol% Al₂O₃/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.
- [93] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, A. Sheikhi, R. Hashemi, Fracture toughness investigation of Al1050/Cu/MgAZ31ZB multi-layered composite produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 734, pp. 427-436, 2018/09/12/, 2018.
- [94] D. Rahmatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. Shojaee, 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*, Vol. 140, No. 10, pp. 101001-101001-11, 2018.