



بررسی خواص مکانیکی و تحولات میکروساختاری آلیاژ آلومینیومی AA1100 فرایند شده به روش فرایند اتصال پرس تجمعی

امیر مصطفی پور^{1*}، وحید محمدی نیا²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه مراغه، مراغه

*تبریز، کد پستی 5166616471، a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 اسفند 1394

پذیرش: 19 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 19 خرداد 1395

کلید واژگان:

تغییر شکل پلاستیک شدید

اتصال پرس تجمعی

خواص مکانیک

خواص متالورژیکی

چکیده

فرایند اتصال پرس تجمعی (APB) یکی از جدیدترین روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید مواد فوق ریزدانه میباشد. هدف از این مقاله، بررسی تاثیر انجام فرایند APB بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی آلیاژ AA1100 می باشد. تغییرات میکروساختاری آلیاژ AA1100 قبل و بعد از انجام فرایند، با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد. نتایج حاصل از مطالعات میکروساختاری نشان میدهد که اندازه کریستالی دانه های تولید شده به روش APB بعد از شش پاس به حدود 950 نانومتر کاهش می یابد. نتایج حاصل از تست کشش و میکروسختی سنجی نیز نشان می دهد که با انجام فرایند APB، استحکام تسلیم بعد از شش پاس از 89 مگاپاسکال به 264 مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است بطوریکه افزایش تقریباً 3 برابری در استحکام مشاهده می شود. مقدار سختی نیز بعد از شش پاس فرایند APB از 38 ویکرز به 61 ویکرز افزایش پیدا می کند. نتایج حاصل از این مقاله نشان می دهد که تغییرات خواص مکانیکی حین فرایند APB، تطابق خوبی با تغییرات ریزساختاری دارد و از رابطه هال - پیچ تبعیت می کند. دلیل افزایش قابل توجه استحکام نیز مربوط به کرنش سختی و کاهش اندازه دانه ها می باشد.

Mechanical properties and microstructure evolution of AA1100 aluminum sheet processed by Accumulative Press Bonding Process

Amir Mostafapur^{1*}, Vahid Mohammadinia²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 March 2016
Accepted 08 May 2016
Available Online 08 June 2016

Keywords:

Sever Plastic Deformation
Accumulative Press Bonding
Mechanical properties
Metallurgic properties

ABSTRACT

Accumulative press bonding (APB) is a novel variant of severe plastic deformation processes (SPD), which has been devised to produce materials with ultra-fine grain (UFG). In the present work, effect of APB technique on mechanical properties and microstructure of AA1100 alloy were investigated. The study of the microstructure of AA1100 alloy was performed via optical microscopy. This article revealed that the grain size of the produced samples decreased to 950 nm, after six passes of APB process. The yield strength of AA1100 alloy after six passes of the process increased up to 264 MPa, which is three times higher than that of the as-cast material (89 MPa). After six passes, microhardness values of AA1100 alloy increased from 38 to 61 HV. Furthermore, the results showed that the behavior of variations in mechanical properties is in accordance with the microstructural changes and it can be justified by using the Hall-Patch equation. Moreover, the rise in the yield strength can be attributed to the reduction of the grain size and strain hardening phenomenon.

1- مقدمه

[3,2] اما اخیراً روش های جدیدی برای افزایش استحکام و خواص این مواد ابداع شده است که با بکارگیری روش هایی جهت ریزدانه کردن می توان خواص مکانیکی و متالورژیکی این آلیاژها را بهبود بخشید. به همین دلیل در سالهای اخیر پیشرفت های زیادی در زمینه مطالعه آلیاژهای آلومینیوم با ساختار فوق ریزدانه و حتی نانوساختار با استفاده از روش های جدید بوجود آمده است [5,4]. مواد فوق ریزدانه با دو رویکرد بالا به پایین و پایین به بالا تولید می شوند. در رویکرد بالا به پائین با دستکاری ساختار درشت ماده،

آلومینیوم و آلیاژهای آن نقش مهمی در علم مهندسی مدرن دارند. این آلیاژها بیشترین مواد فلزی غیر آهنی مورد استفاده در صنعت می باشند و بطور وسیعی در صنایع اتومبیل سازی، هوافضا و مهندسی ساخت بدلیل مقاومت به خوردگی بالا و خواص مکانیکی مطلوب نظیر قابلیت ماشینکاری و جوشکاری و همچنین هزینه پایین بکار برده می شوند [2,1]. آلیاژسازی و پیرسختی مهم ترین راهکارها، جهت بهبود استحکام آلیاژهای آلومینیومی می باشند

روی نمونه‌ها انجام گردید [14]. شمایکی از ریزساختار آلومینیوم آنیل شده در شکل 1 نشان داده شده است. اندازه دانه بدست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری برای آلومینیوم آنیل شده برابر با $34\mu\text{m}$ می‌باشد. برای انجام فرایند APB، ابتدا ورق‌های آلومینیومی آنیل شده، با مایع استون شستشو داده شد تا هرگونه چربی و آلودگی از سطح ورق‌ها از بین برود. بعد از آن برای از بین بردن اکسیدهای سطحی قطعات، عمل برس کاری انجام گردید [15]. عمل برس کاری با دستگاه دریل و برس سیمی به قطر 0.4 میلی متر انجام شد. بعد از عمل برسکاری، ورق‌ها از سمتی که برسکاری شده بودند، روی هم قرار داده شد بطوریکه ضخامت مجموع ورق‌ها برابر سه میلی‌متر شود. سپس این دو ورق در بین صفحات سخت کاری شده قرار گرفته و عمل پرس با کرنش پنجاه درصد یعنی کاهش ضخامت 1.5 میلی متری انجام گردید. برای انجام پاس‌های بعدی، ورق تولید شده، از وسط بریده شده و مانند پاس اول بعد از عمل تمیزکاری و برس کاری، مجدداً فرایند پرسکاری با کرنش 50% انجام گرفت. این عمل تا شش پاس تکرار شد تا در نهایت ورق آلیاژی با ساختار فوق ریزدانه تولید شود. لازم به ذکر است که فاصله زمانی بین عمل برسکاری و پرس جهت جلوگیری از اکسید شدن دوباره سطح ورق‌ها نباید بیشتر از 120 ثانیه باشد. شکل شماره 2 نحوه انجام فرایند APB را نشان می‌دهد [14].

2-1- روش مطالعات ریز ساختاری

برای بررسی ریزساختار نمونه‌های تولید شده به روش APB، ریزساختار نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند. در همین راستا جهت انجام متالوگرافی، نمونه‌های بدست آمده از پاس‌های مختلف فرایند ابتدا مانت سرد شده و سپس پولیش مکانیکی روی آن‌ها انجام گرفت. بدین ترتیب که ابتدا سنباده زنی از شماره 80 تا 1200 بر روی نمونه‌ها انجام گرفته و سپس با خمیر الماسه پولیش شدند. بعد از پولیش‌زنی، برای اچ کردن نمونه‌ها، از روش الکترواچ استفاده شد. در نهایت عمل عکسبرداری از

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ AA1100

Table 1 Chemical composition of AA1100 alloy

عنصر	تیتانیوم	سیلیسیم	مس	آهن	آلومینیوم
درصد	0.005	0.171	0.055	0.345	بقیه
وزنی					

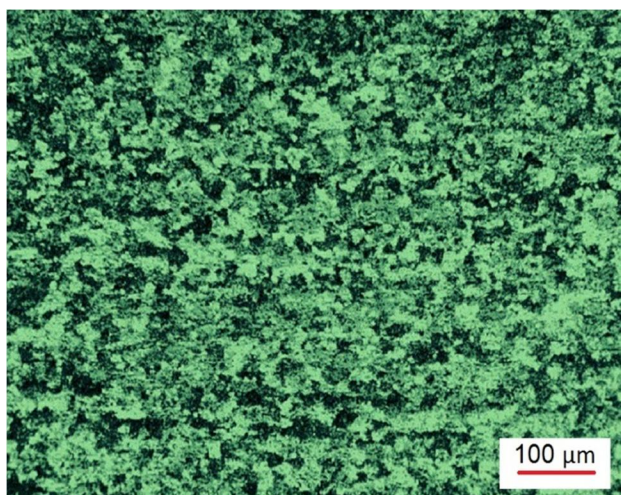


Fig. 1 Image of optical microscopy from annealed AA1100 alloy

شکل 1 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ AA1100

ساختار به ابعاد نانومتری می‌رسد. ولی در رویکرد دوم ماده بالک از ابتدا بوسیله چپش اتم‌ها با اجزای نانو ساخته می‌شود [6,5,2]. روش‌های مبتنی بر رویکرد اول در مقایسه با روش‌های مبتنی بر رویکرد دوم دارای مزایایی هستند که مهم ترین آن‌ها عبارتند از: 1. ابعاد و حجم نمونه‌های بدست آمده از این روش‌ها بزرگتر می‌باشند 2. در حین فرایند تولید، هیچ گونه آلودگی و تخلخل در محصول ایجاد نمی‌شود 3. با استفاده از این روش‌ها می‌توان طیف وسیعی از فلزات و آلیاژها را فراوری کرد [5]. در رویکرد بالا به پایین روش‌های گوناگونی وجود دارد که دسته‌ای از آنها بر پایه اعمال کار مکانیکی بر روی ماده می‌باشند. یکی از روش‌های اصلی این دسته، روش تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد [7]. روش تغییر شکل پلاستیک شدید خود دارای روش‌های متفاوتی نظیر فرایند پرس در کانال زاویه‌دار (ECAP) [10,9,8]¹، فرایند پیچش با فشار بالا (HPT)² [11]، فرایند اتصال نورد تجمع و غیره می‌باشند [12]. بطور کلی برای تولید مواد فلزی فوق ریزدانه با استفاده از این روش‌ها لازم است اولاً کرنش زیادی به ماده اعمال شود تا دانسیته بالایی از نابجایی‌ها تولید گردد، ثانیاً نابجایی‌های تولید شده آرایش مجدد یافته و آرایه‌ای از مرزدانه‌ها ایجاد کنند [6].

روش APB³ یکی از جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک می‌باشد که برای اولین بار توسط امیرخانلو و همکارانش در سال 2013 میلادی برای تولید نانو کامپوزیت AL/WCp بکار گرفته شده است [13]. در زمینه این فرایند جدید، بغیر از کار ذکر شده، تحقیق دیگری بصورت مقاله ارائه نشده است. این فرایند قابلیت تولید مواد با ساختار فوق ریزدانه و حتی مواد نانوساختار را دارا می‌باشد. علاوه بر آن یک روش مناسب برای اتصال فلزات همجنس و غیر همجنس در حالت سرد و گرم نیز می‌باشد. از مزایای مهم دیگر این روش ساده بودن و عدم نیاز به تجهیزات گران قیمت و قالب‌های خاص برای انجام این فرایند نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک می‌باشد. به این خاطر در این مقاله قابلیت فرایند APB برای ریزدانه کردن قطعات آلومینیومی در پاس‌های مختلف بررسی شده است و خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات در پاس‌های مختلف مطالعه شده است. فرایند APB شامل مراحل متوالی آماده سازی سطوح، قرار دادن و محکم کردن ورق‌ها بر روی یکدیگر و سپس انجام عمل پرس با کاهش ضخامت 50% و تولید ورق یکپارچه با ضخامت اولیه می‌باشد. بعد از برش ورق از راستای طولی و انجام مجدد مراحل قبلی، پاس‌های مختلف تا دستیابی به یک کرنش دلخواه، انجام می‌گیرد. از آنجایی که ضخامت ورق حین فرایند ثابت است محدودیتی در اعمال کرنش وجود ندارد و می‌توان ورق‌هایی با اندازه دانه خیلی ریز و استحکام بالا تولید کرد [13].

با توجه به اینکه این روش به تازگی ابداع شده، کارهای قبلی چندانی در این زمینه وجود ندارد. هدف از این مقاله مطالعه اثر فرایند APB و تاثیر تعداد پاس‌های فرایند بر خواص مکانیکی و متالورژیکی آلیاژ AA1100 می‌باشد.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیومی AA1100 که ترکیب شیمیایی آن در جدول شماره 1 آورده شده به عنوان ماده خام استفاده شد. ورق آلومینیومی در ابعاد $50 \times 25 \times 1.5$ میلی‌متر بریده شده و سپس عملیات حرارتی آنیل کامل در کوره الکتریکی و در دمای 375 درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت بر

¹ Equal channel angular pressing (ECAP)

² High Pressure Torsion (HPT)

³ Accumulative Press Bonding (APB)

مشابه نیز مقایسه شده است. در میان انواع روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیکی، فرایند ARB³ بسیار شبیه به فرایند APB می‌باشد با این تفاوت که در فرایند APB فشار وارده به قطعه کار بصورت سطحی و همزمان به کل سطح وارد می‌شود و بجای رول‌ها از نیروی پرس استفاده می‌شود ولی در روش ARB نیروی وارد به قطعه کار بصورت خطی می‌باشد و همچنین در روش APB محدودیت ضخامت ورق وجود ندارد و با استفاده از این روش می‌توان مواد حجمی را نیز فرآوری کرد. به همین دلیل از نتایج حاصل از فرایند ARB که مشابهت زیادی با روش APB دارد، جهت مقایسه این دو فرایند با یکدیگر استفاده شده است. برای این کار از نتایج مقاله مرجع [16] استفاده شد. در این مقاله نیز ماده بکار رفته آلومینیم خالص تجاری بود که با روش ARB تا شش پاس تحت فرایند قرار گرفت. در روش ARB نیز فرایند در دمای محیط انجام گرفته و ورق اولیه قبل از شروع فرایند در دمای 370 درجه سانتی گراد به مدت 2 ساعت آنیل شده بود.

3- بحث و بررسی

3-1- مطالعات میکروساختاری

عکس‌های حاصل از متالوگرافی نمونه‌های پولیش شده که عملیات اچ برروی آنها انجام نگرفته در شکل 4 نشان داده شده است. هدف از این کار بررسی نحوه اتصال لایه‌ها در پاس‌های مختلف فرایند APB می‌باشد. مشاهده می‌شود که در پاس‌های اولیه فرایند، اتصال کامل بین لایه‌ها انجام نگرفته است و در برخی نواحی شاهد عدم اتصال در فصل مشترک دو لایه هستیم و این بدلیل وجود آلودگی و لایه‌های اکسیدی در فصل مشترک دو لایه می‌باشد (شکل 5). طبق تئوری فیلم سطحی برای اتصال بین دو لایه در حالت جوش سرد، نیرو باید به اندازه کافی زیاد باشد که لایه اکسیدی روی سطوح ورق‌ها شکسته شده و فلزات ناب از دو طرف لایه‌ها به هم اکستروند شوند و اتصال اتم به اتم بین لایه‌ها برقرار شده و جوش سرد انجام شود [15, 17]. با توجه به این مسئله شکسته شدن لایه‌های سطحی در پاس‌های بالاتر بطور کامل انجام گرفته است.

در شکل 6 نیز ریزساختار نمونه‌های اچ شده نشان داده شده است. همانطور که در نمونه پاس اول مشاهده می‌شود، دانه‌ها در امتداد طولی سطح مقطع دچار کشیدگی شده و باریکتر شده‌اند. اندازه دانه‌ها در امتداد طولی در چند ناحیه اندازه‌گیری شده و میانگین اندازه دانه بدست آمده برای پاس اول در حدود $24 \mu\text{m}$ بدست آمد. در پاس سوم فرایند کشیدگی دانه‌ها در امتداد طولی بشتر شده اما خرد شدن دانه‌ها مشاهده نمی‌شود. اندازه کریستالی بدست آمده در این پاس، $15 \mu\text{m}$ می‌باشد. در پاس پنجم دانه‌ها در امتداد طولی سطح مقطع کاملاً کشیده شده‌اند و خرد شدن دانه‌ها در اکثر نواحی کاملاً مشخص است. میانگین اندازه دانه‌های محاسبه شده در این پاس به صورت تقریبی $1 \mu\text{m}$ می‌باشد. در پاس ششم فرایند APB خرد شدن دانه‌ها کاملاً مشخص است و تشخیص دانه‌ها به سختی ممکن است و میانگین اندازه دانه محاسبه شده در این پاس به صورت تقریبی 950 nm می‌باشد. براساس نتایج بدست آمده از اندازه کریستالی دانه‌ها، با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB، اندازه دانه‌ها کوچکتر شده است که می‌توان نتیجه گرفت که این کاهش اندازه دانه، به دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک در پاس‌های اولیه می‌باشد و در پاس‌های نهایی تجمع موضعی نابجایی‌ها و اختلاف زاویه‌ای در شبکه باعث خرد شدن دانه‌ها و تشکیل دانه‌های ریز می‌شود [18, 19].

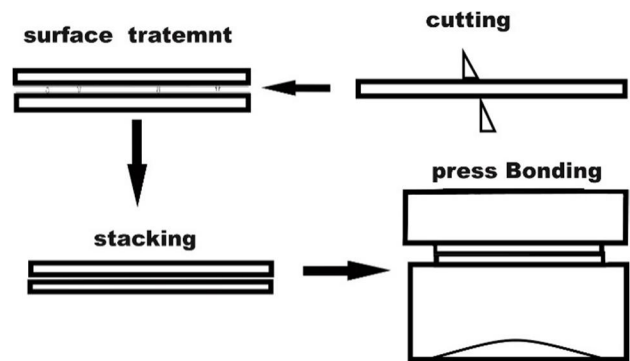


Fig. 2 Schematic illustration of APB process

شکل 2 شماتیک نحوه انجام فرایند APB [13].

ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام گرفت. همچنین در مورد اندازه دانه‌های بدست آمده از آزمایشات، باید یادآور شد که پولیش و نحوه اچ قطعات آلومینیومی خالص، به دلیل تشکیل بسیار سریع لایه اکسیدی، یکی از مشکل‌ترین بخش‌های متالوگرافی می‌باشد بطوریکه تشخیص اندازه دانه‌ها در نمونه‌های آزمایشی، مخصوصاً در پاس‌های نهایی به دلیل ریز شدن بیش از حد دانه‌ها، بسیار سخت می‌باشد. به همین دلیل برای مشخص کردن اندازه تقریبی دانه‌ها بعد از عکسبرداری از ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری از نرم افزار ایمج آنالایزر¹ استفاده شد. بدین ترتیب که با استفاده از نرم افزار در چند ناحیه اندازه دانه‌ها تعیین شد و سپس اندازه میانگین ثبت گردید.

2-2- روش مطالعه خواص مکانیکی

برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده به روش APB، از تست کشش و آزمون میکروسختی سنجی استفاده شد. جهت انجام آزمون کشش، ابتدا نمونه‌های آزمون، طبق استاندارد ASTM E8/E8M در ابعاد نشان داده شده در شکل 3، با دستگاه وایپرکات بریده شده و سپس با دستگاه تست کشش مدل زویک² و با سرعت 1 mm/min تست کشش انجام شد [13]. آزمون میکروسختی سنجی نیز با دستگاه میکرو هاردنس مدل M-400G-GT-G3G3 و بر اساس استاندارد ASTM E384-11e1 انجام شد. بر اساس این استاندارد از هفت نقطه از نمونه بصورت تصادفی آزمون میکروسختی سنجی انجام گرفته و از بیشترین و کمترین مقدار هر نمونه صرف نظر شده و سپس میانگین 5 نقطه باقی مانده از آزمون میکروسختی به عنوان سختی کل نمونه گزارش گردید [14]. در آزمون میکروسختی سنجی، مقدار بار 50 gr و مدت زمان اعمال بار 10 ثانیه انتخاب شد.

علاوه بر این نتایج حاصل از این فرایند با نتایج حاصل از فرایندهای

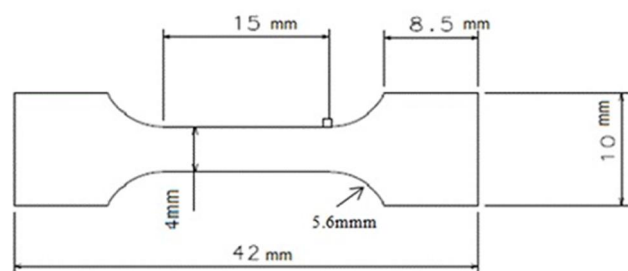


Fig. 3 Dimensions of the tensile test samples

شکل 3 ابعاد نمونه برای تست کشش [13].

¹ Image Analyser

² Zwick/Roell- Z010

³ Accumulative Roll Bonding (ARB)

سیکل‌های بعدی به داخل ضخامت ورق منتقل شود و باعث افزایش میزان کرنش اعمالی نهایی به ورق گردد بنابراین بعد از چند سیکل، کل ماده می‌تواند تحت تأثیر کرنش برشی شدید قرار گیرد [20,13].

2-3- خواص مکانیکی

نتایج حاصل از تست کشش در شکل 7 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند APB، استحکام تسلیم افزایش می‌یابد (شکل 6)؛ طوریکه استحکام تسلیم برای ماده اولیه از 89.19 MPa به 264.95 MPa برای پاس ششم APB می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش استحکام تسلیم به اندازه 2.97 برابر می‌باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده، دو مکانیزم اصلی برای افزایش استحکام در فرایندهای SPD ارائه شده است: کرنش سختی و دیگری ریز دانه شدن [22,21,13]. در مکانیزم کرنش سختی یا کار سختی، با افزایش تعداد سیکل‌ها، تغییر شکل پلاستیک فلز بیشتر شده و چگالی نابجائی‌های افزایش می‌یابد. در نتیجه به دلیل افزایش میزان کرنش، نابجائی‌ها با یکدیگر قفل شده و قفل شدن این نابجائی‌ها به همدیگر، باعث کرنش سختی و در نتیجه باعث استحکام بخشی به فلز می‌شود. در مکانیزم ریز دانه شدن، با افزایش تعداد پاس‌های فرایند به دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک و مقدار تنش اعمالی، اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش اندازه دانه یکی از مکانیزم‌های رایج استحکام بخشی فلزات می‌باشد [24,23] که این امر در نمودارهای مربوط به پاس‌های مختلف فرایند APB بیشتر مشهود است (شکل 7) و همچنین مقادیر استحکام تسلیم و نهایی در جدول 2 نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس‌ها، استحکام تسلیم افزایش یافته و ازدیاد طول کاهش یافته است (شکل 8). در نتایج حاصل از مطالعات ریزساختاری این نقطه مشهود بود که، بعد از پاس ششم اندازه دانه‌های کریستالی از 36 μm برای ماده خام اولیه به 950 nm کاهش پیدا کرده است. همچنین ارتباط بین این کاهش اندازه دانه و افزایش استحکام را می‌توان با رابطه هال-پچ توجیه نمود [9].

$$\sigma_y = \sigma_i + \frac{K_y}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

که در این معادله σ_i تنش اصطکاکی، k پارامتر قفل شدن و D قطر متوسط دانه‌ها است. با توجه به معادله فوق با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای σ_i و k ، دیده می‌شود که با کاهش اندازه دانه، استحکام تسلیم افزایش می‌یابد.

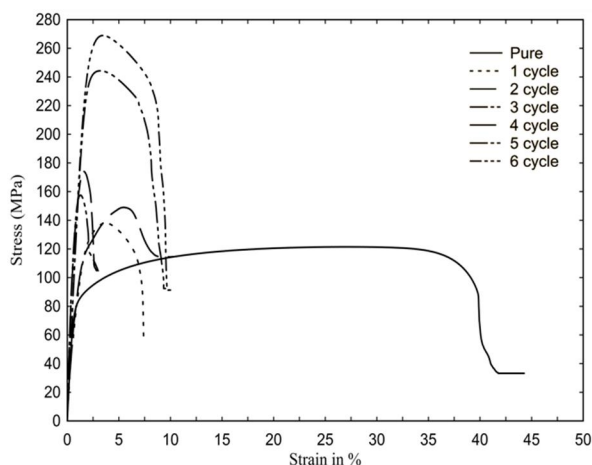


Fig.7 Stress-strain curve of fabricated samples with different number of passes of the APB process

شکل 7 نمودار تنش - کرنش مهندسی در پاس‌های مختلف فرایند APB

همچنین مکانیزم تغییر فرم شدید برشی در زیر سطح به وسیله اصطکاک بین پرس و ورق تولید می‌شود. این ناحیه به شدت تغییر فرم یافته، می‌تواند حین

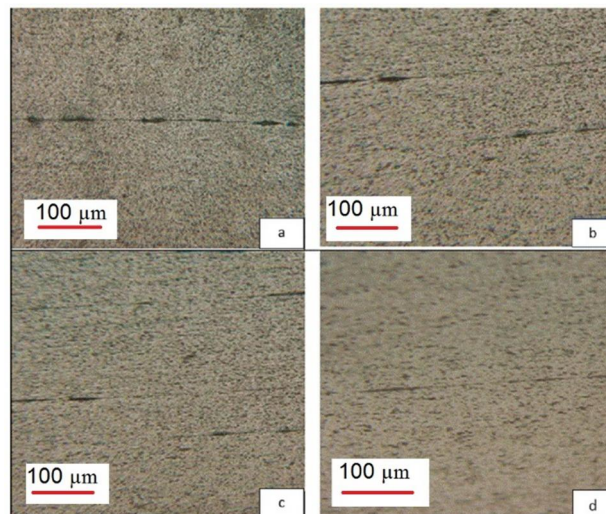


Fig. 4 Optical microscopy of the samples produced by APB process in 10X magnification (a) the first pass (b) the third pass (c) the fifth pass (d) the sixth pass

شکل 4 عکس‌های متالوگرافی با بزرگنمایی 10x از نمونه های APB شده (a) پاس اول (b) پاس سوم (c) پاس پنجم (d) پاس ششم

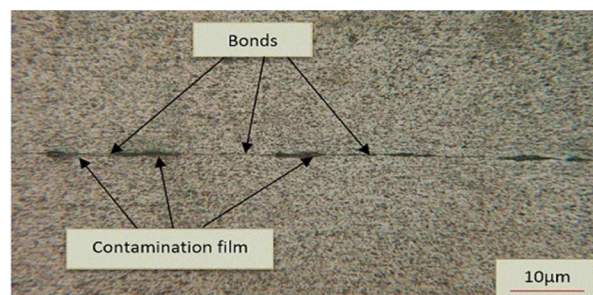


Fig. 5 An illustration of the mechanism of the surface film formation in the first pass of APB process

شکل 5 شماتیکی از مکانیزم فیلم سطحی در پاس اول فرایند APB

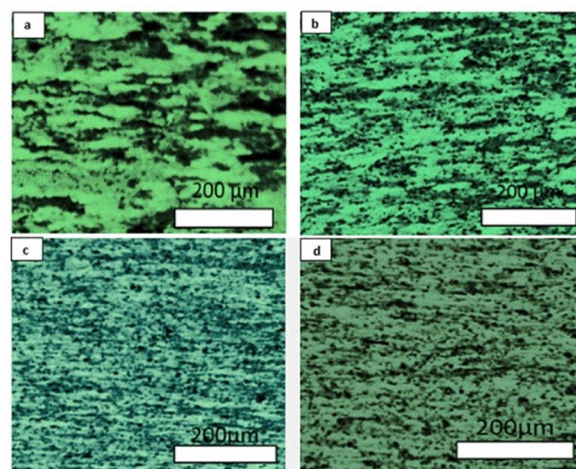


Fig. 6 Polarized optical microscopy images of the cross section in X100 micrometer scale (a) the first pass (b) the third pass (c) the fifth pass (d) the sixth pass

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری پلاریزه از مقطع عرضی (a) پاس اول، (b) پاس سوم، (c) پاس پنجم و (d) پاس ششم

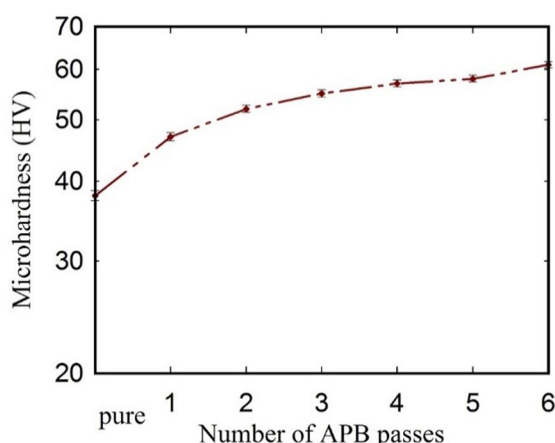


Fig. 9 Diagram of hardness changes in various passes of the APB process

شکل 9 نمودار تغییرات سختی در پاس‌های مختلف فرایند APB

دیده می‌شود، با افزایش تعداد پاس‌ها، استحکام نهائی در هر دو فرایند افزایش می‌یابد. ولی افزایش استحکام در فرایند APB مخصوصاً در پاس‌های آخر بیشتر از فرایند مشابه ARB می‌باشد؛ بطوریکه بیشترین مقدار استحکام نهائی بدست آمده برای فرایند ARB در پاس ششم 250 MPa می‌باشد، در حالی که استحکام تسلیم برای ورق آلایژ AA1100 بعد از شش پاس فرایند APB، 264.95 MPa می‌باشد که افزایشی در حد 1.29 برابر را نشان می‌دهد. دلیل اختلاف خواص مکانیکی در این دو فرایند تحت کرنش یکسان را می‌توان به تفاوت در نحوه اعمال کرنش فرایند APB با فرایند ARB، انجام فرایند در دمای محیط و شرایط آزمایشگاهی در دو فرایند مربوط دانست. همچنین مکانیزم تغییر فرم شدید برشی در فرایند APB که در زیر سطح به وسیله اصطکاک بین پرس و ورق تولید می‌شود، با افزایش تعداد پاس‌های فرایند می‌تواند به داخل ضخامت ورق منتقل شود و باعث افزایش میزان کرنش اعمالی نهائی به ورق گردد بنابراین بعد از چند پاس تمام ضخامت ماده می‌تواند تحت تأثیر کرنش برشی شدید قرار گیرد. در نتیجه می‌تواند باعث ریزدانه شدن و افزایش استحکام شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ساختار فوق ریزدانه آلایژ AA1100 توسط فرایند جدید

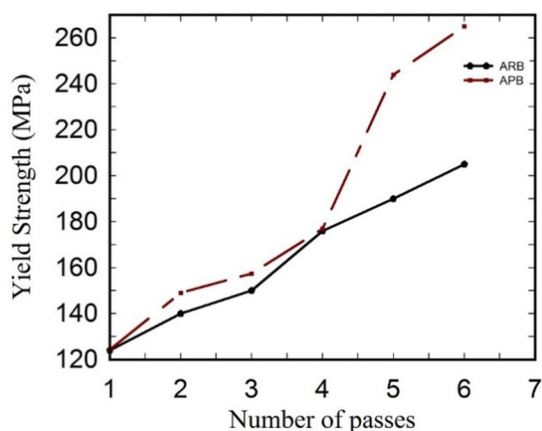


Fig. 10 Comparison of yield strength of AA1100 fabricated via APB and ARB in the 6 passes of both processes

شکل 10 مقایسه استحکام تسلیم آلایژ AA1100 تولید شده به روش APB و آلومینیوم خالص تجاری تولید شده به روش ARB [16].

جدول 2 مقادیر تنش تسلیم و نهائی در پاس‌های مختلف فرایند APB

Table 2 Yield and ultimate strength of samples in different passes of the APB process

شماره پاس	آلومینیوم خالص	1	2	3	4	5	6
استحکام تسلیم (MPa) ARB	89.19	120.1	124.2	152.8	172.4	242.6	269.9
استحکام نهائی (MPa) APB	121.4	138.4	148.9	157.5	176.1	244.3	268.9

مطابق نمودار نشان داده شده در شکل 8، درصد ازدیاد طول ابتدا به شدت کاهش یافته است. این افت ناگهانی درصد افزایش طول نمونه، پس از نخستین مرحله فرایند APB یعنی پس از 50% کاهش ضخامت، با کاهش تحرک نابیجی‌ها یا به عبارت دیگر با نرخ کار سختی و همچنین کاهش تعداد باندهای برشی قابل توجیه است. کاهش انعطاف پذیری به طور مؤثر تحت تأثیر کار سختی ماده است [24]. بطور کلی مواد با ساختار بسیار کوچک، تغییر شکل کمتر و محدودتری نسبت به مواد درشت دانه، تحت بار از خود نشان می‌دهند که علت آن کاهش و کم بودن فعالیت نابیجی‌ها می‌باشد؛ به عبارت دیگر کم بودن نرخ کار سختی و نیز باندهای برشی موجود در آن‌ها باعث افت شدید درصد ازدیاد طول می‌باشد [24-26]. تحقیقات نشان می‌دهد که نرخ کار سختی ($d\sigma/d\epsilon$) با ریز شدن دانه‌ها نه تنها افزایش نیافته، بلکه کاهش هم می‌یابد [24,25].

نتایج تست میکرو سختی سنجی نیز در نمودار شکل 9 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های APB، سختی افزایش پیدا کرده و سختی از 38 HV برای ماده خام، بعد از شش پاس به 61 HV رسیده که 1.6 برابر افزایش مشاهده می‌شود. افزایش سریع سختی در مراحل اولیه فرایند قابل ملاحظه می‌باشد که مربوط به کرنش سختی و افزایش نابیجی‌ها می‌باشد [27]. در حالی که در پاس‌های نهایی ریزدانه شدن، مکانیزم غالب افزایش سختی می‌باشد که اثر کاهش اندازه دانه به کرنش سختی غلبه می‌کند در نتیجه نرخ افزایش سختی لایه‌ها کاهش یافته است [27,28].

نتایج تست کشش نمونه‌های فرایند ARB شده در پاس‌های مختلف و مقایسه نتایج این دو فرایند در شکل 10 نشان داده شده است. همانطور که

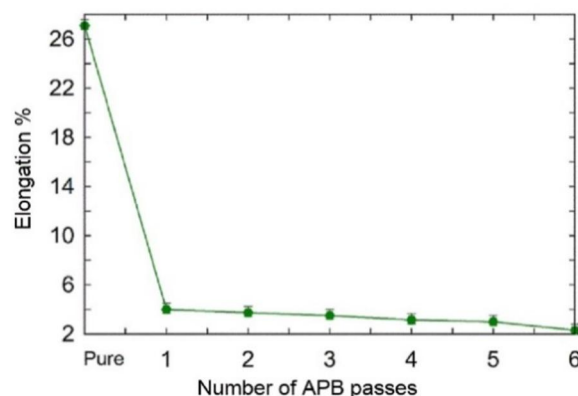


Fig. 8 Diagram of percentage elongation of AA1100 alloy fabricated by different passes of APB process

شکل 8 نمودار درصد ازدیاد طول آلایژ AA1100 تولید شده به روش APB در پاس‌های مختلف

- deformation technique based on simple and pure shear, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 145-154, 2016. (in Persian فارسی)
- [8] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, 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.
 - [9] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. G. Hong, Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
 - [10] M. A. Ranaei, A. Afsari, S. Y. Ahmadi, Brooghani, M. M. Moshksar, Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-267, 2014. (in Persian فارسی)
 - [11] R. Z. Valiev, N. A. Krasilnikov, N. K. Tsenev, Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 137, No. 11, pp. 35-40, 1991.
 - [12] R. Z. Valiev, Structure and mechanical properties of ultrafine-grained metals, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 51, No. 234-236, pp. 59-66, 1997.
 - [13] S. Amirkhanlou, M. Ketabchi, N. Parvin, S. Khorsand, R. Bahrami, Accumulative press bonding; a novel manufacturing process of nanostructured metal matrix composites, *Materials & Design*, Vol. 51, No. 13, pp. 367-374, 2013.
 - [14] M. R. Toroghinejad, R. Jamaati, J. Dutkiewicz, J. A. Szpunar, Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process, *Materials & Design*, Vol. 51, No. 21, pp. 274-279, 2013.
 - [15] M. Eizadjou, H. Danesh Manesh, K. Janghorban, Mechanism of warm and cold roll bonding of aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 10, pp. 4156-4161, 2009.
 - [16] M. Raei, M. Toroghinejad, R. Jamaati, J. Szpunar, Effect of ARB process on textural evolution of AA1100 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 26, pp. 7068-7073, 2010.
 - [17] H. A. Mohamed, J. Washburn, Mechanism of solid state pressure welding, *Welding Journal*, Vol. 54, No. 9, pp. 302-310, 1975.
 - [18] N. Tsuji, T. Toyoda, Y. Minamino, Microstructural change of ultrafine-grained aluminum during high-speed plastic deformation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 350, No. 1-2, pp. 108-116, 2003.
 - [19] A. Rezaee-Bazzaz, S. Ahmadian, H. Reihani, Modeling of microstructure and mechanical behavior of ultra-fine grained aluminum produced by accumulative roll-bonding, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 8-9, pp. 4580-4585, 2011.
 - [20] S. H. Lee, Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, Role of shear strain in ultragrain refinement by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 46, No. 4, pp. 281-285, 2002.
 - [21] 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. 1-2, pp. 265-271, 2003.
 - [22] N. Wang, Z. Wang, K. T. Aust, U. Erb, Effect of grain size on mechanical properties of nanocrystalline materials, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 43, No. 2, pp. 519-528, 1995.
 - [23] 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. 1-2, pp. 132-138, 2008.
 - [24] D. G. Morris, Strength and ductility of nanocrystalline materials: What do really understand?, *Proceeding of the 22th Riso international symposium on materials science: Science of metastable and nanocrystalline alloys structure, properties and modeling*, Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, pp. 255-262, 2001.
 - [25] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito, Y. Minamino, Strength and ductility of ultra-fine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing, *Scripta Materialia*, Vol. 47, No. 12, pp. 893-899, 2002.
 - [26] Y. M. Wang, E. Ma, Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 6, pp. 1699-1709, 2004.
 - [27] J. Gubicza, N. Q. Chinh, T. Csanadi, T. G. Longdon, T. Ungar, Microstructure and strength of severely deformed fcc metals, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 462, No. 1, pp. 86-90, 2007.
 - [28] F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and related annealing phenomena*, Second Edition, Elsevier, UK, Oxford, pp. 86-95, 2004.
- APB در شش پاس با موفقیت تولید شد. نتایج حاصل از مطالعات میکروساختاری و خواص مکانیکی این آلیاژ به صورت زیر می باشد:
1. نتایج حاصل از متالوگرافی نشان می دهد که با افزایش تعداد پاس های فرایند APB، کیفیت اتصال بهبود می یابد.
 2. بر اساس مطالعات میکروساختاری انجام شده با میکروسکوپ نوری، دانه های بسیار ریز و با اندازه تقریبی حدود 950 nm در شش پاس، توسط فرایند APB تولید شد.
 3. استحکام تسلیم آلیاژ با افزایش تعداد پاس های فرایند APB بعد از شش پاس به بیشترین مقدار خود، یعنی 264 MPa رسید که 2.91 برابر، بزرگتر از مقدار بدست آمده برای آلیاژ AA1100 آنیل شده می باشد.
 4. درصد ازدیاد طول با افزایش تعداد پاس های فرایند APB کاهش می یابد.
 5. نتایج میکروسختی نشان می دهد که با افزایش تعداد پاس های فرایند APB سختی آلیاژ افزایش می یابد و مقدار سختی از 38 HV برای آلیاژ AA1100 آنیل شده، به 61 HV در پاس ششم افزایش می یابد.
 6. مقایسه دو فرایند APB و ARB نشان می دهد که با افزایش تعداد پاس ها در هر دو فرایند، استحکام نهائی در هر دو فرایند افزایش می یابد. ولی افزایش استحکام در فرایند APB مخصوصا در پاس های آخر بیشتر از فرایند مشابه ARB می باشد؛ بطوریکه بیشترین مقدار استحکام نهائی بدست آمده برای فرایند ARB در پاس ششم 205 MPa می باشد، در حالی که استحکام تسلیم برای ورق آلیاژی AA1100 بعد از شش پاس فرایند APB، 264.95 MPa می باشد که افزایشی در حد 1.29 برابر را نشان می دهد.

5- مراجع

- [1] M. Dehghan, F. Qods, M. Gerdooei, Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of the ARB- processed of the purity Aluminium with interpassing heat treatment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 123-132, 2013. (in Persian فارسی)
- [2] I. Sabirov, M. Yu Murashkin, R. Z. Valiev, Nanostructured aluminum alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 560, No. 21, pp. 1-24, 2013.
- [3] A. Azushima, R. Koop, D. Y. Yang, Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 2, pp. 716-735, 2008.
- [4] R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials*, Vol. 58, No. 4, pp. 33-39, 2006.
- [5] P. B. Prangnell, J. R. Bowen, P. J. Apps, Ultra-fine grain structures in aluminum alloys by severe deformation processing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 375-377, No. 11, pp. 178-185, 2004.
- [6] D. A. Hughes, N. Hansen, High angle boundaries formed by grain subdivision mechanisms, *Acta Materialia*, Vol. 45, No. 9, pp. 3871-3886, 1997.
- [7] M. Mahmoudi, A. Shokuhfar, S. Nakhodchi, A new severe plastic