



تحلیل تجربی چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای ورق‌های آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

داود رحمت آبادی¹، رامین هاشمی^{2*}، بیژن محمدی²، تقی شجاعی³

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

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

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 دی 1395

پذیرش: 24 دی 1395

ارائه در سایت: 10 بهمن 1395

کلید واژگان:

چقرمگی شکست

نورد سرد پیوندی

ورق آلومینیوم 1050

خواص مکانیکی و میکروسکوپ الکترونی

رویشی

چکیده

فرآیند پیوند سرد نوردی یکی از روش‌های تولید ورق‌های لایه‌ای با جنس مشابه و غیرمشابه می‌باشد که در یک دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این تحقیق برای اولین بار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای به صورت تجربی برای نمونه‌ی نازک دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از نمونه‌های کششی فشرده و مطابق با استاندارد ASTM E561 مشخص شده است. چقرمگی شکست یکی از پارامترهای مهم ماده در طراحی می‌باشد که بررسی آن به منظور پیش‌بینی عمر و رشد ترک مواد ترک‌دار در برابر اعمال تنش می‌باشد. علاوه بر بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش تک محوره و میکروسختی و سطح مقطع شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روشی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که مقادیر استحکام کششی، میکروسختی و چقرمگی شکست برای نمونه‌ی دولایه به مراتب بیشتر از نمونه‌ی اولیه می‌باشد که نسبت به ورق اولیه به ترتیب 150٪، 80٪ و 51٪ بهبود یافت. البته مقدار ازدیاد طول نیز کاهش می‌یابد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نشان می‌دهد که میکروخف‌ها سطح مقطع شکست کم‌عمق‌تر می‌شوند که همین عامل تأییدکننده افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری می‌باشد. البته نقش اصلی تغییرات ایجاد شده را اعمال کرنش زیاد و کار سرد ایفا می‌کند.

Experimental investigation of plane stress fracture toughness for aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding Process

Davood Rahmatabadi, Ramin Hashemi*, Bijan Mohammadi, Taghi Shojaei

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 02 January 2017
Accepted 13 January 2017
Available Online 29 January 2017

Keywords:

Fracture toughness
CRB
1050 aluminum sheet
mechanical properties
SEM

ABSTRACT

Cold roll bonding process is one method for production of multi-layered sheets with the same and dissimilar materials that, in the past decade has received the attention of many researchers. In this research, for the first time and according to ASTM-E561 and using compact tension specimens investigated plane stress fracture toughness for thin two layer aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding Process. The fracture toughness is an important parameter in the design, as their analysis can predict crack growth and life for material that has crack. In addition to the fracture toughness, mechanical properties and tensile fracture surfaces were evaluated by using uni-axial tensile test, micro hardness and scanning electron microscopy, respectively. Results of these tests demonstrated that value of tensile strength, micro hardness and plane stress fracture toughness for two layers of aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding process is far more than annealed sample that was compared to the initial sheet improved 150%, 80% and 51% respectively. But value of elongation decreased. Also, results of SEM demonstrated that dimples were shallower and smaller than the initial sample which confirmed increasing strength and reduced ductility. Of course the main role of this variation is applying high strain and cold working.

1- مقدمه

ویژگی جالب و به‌صورت همزمان مانند چگالی کم، خواص مکانیکی مطلوب، هدایت حرارتی خوب و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلیاژهای چندلایه، روش پیوند سرد نوردی در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های کاربردی منحصر به

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

Please cite this article using:

D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaei, Experimental 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 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نمونه‌ی اولیه و تولید شده را مقایسه کرد، زیرا ضخامت از پارامترهای موثر در خواص مکانیکی و شکست می‌باشد، این خاصیت، از مزیت‌های فرآیندهای تغییرشکل شدید پلاستیک⁵ می‌باشد، چون در حین فرآیند پیوند سرد نوردی ضخامت ثابت باقی می‌ماند، می‌توان کرنش نامحدود به نمونه اعمال کرد که این عمل باعث بهبود خواص مکانیکی و شکست می‌شود بدون آن که ضخامت تغییر کند. در این تحقیق برای اولین بار بررسی چقرمگی شکست برای نمونه‌های دو لایه تولید شده به روش نورد سرد پیوندی به صورت تجربی و با استفاده از منحنی آر صورت گرفته است و با توجه به این که فرآیند پیوند سرد نوردی یکی از روش‌های ساده، کم هزینه و پرکاربرد می‌باشد، بررسی مقاومت به رشد ترک برای نمونه‌های تولیدی با این روش ضروری به نظر می‌رسد.

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 پیوند سرد نوردی 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 کوره صورت گرفت. خنک‌کاری نمونه‌های آنیل شده به وسیله هوا و در کوره انجام شد.

2-2- فرآیند پیوند سرد نوردی

به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریز ساختاری و چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای، ورق دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند نوردی، نمونه‌های اولیه در ابعاد 125 میلی‌متر طول، 75 میلی‌متر عرض و 1 میلی‌متر ضخامت بریده شد. شماتیک فرآیند پیوند نوردی در "شکل 1" نشان داده شده است. بر این اساس ابتدا دو قطعه از ورق اولیه با استفاده از آب و صابون شسته شده و سپس در حمام استون چربی زدایی می‌شود و پیش از عملیات چربی‌زدایی، توسط برس فولادی خراشیده و زیر می‌شوند [27] و سپس دو ورق روی هم قرار داده شد. البته به منظور جلوگیری از لغزش آن‌ها بر روی هم، نمونه‌ها را از چهار طرف سوراخ کرده و توسط سیم فولادی بهم محکم بسته می‌شوند و سپس پیوند نوردی با 50% کاهش ضخامت برقرار شد. توجه شود که به منظور جلوگیری از اکسیدشدن لایه‌های سطحی، زمان بین آماده‌سازی سطوح و عملیات نورد نباید بیشتر از 150 ثانیه باشد [27]. در مرحله بعد ورق‌های روی هم گذاشته شده به وسیله نوردی با قطر غلطک‌های 110 میلی‌متر و در دمای اتاق نورد شده و پیوند مورد نظر بین لایه‌های در تماس ایجاد می‌شود.

2-3- بررسی خواص مکانیکی و شکست

برای سیکل‌های مختلف، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین وایبرکات مطابق با (استاندارد مربوطه⁶) آماده شد. آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ و با استفاده از دستگاه سنتم انجام شد. مقدار ازدیاد طول نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری طول گیج، قبل و بعد از آزمون کشش تعیین شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه‌ها 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) اندازه‌گیری شد. قبل

فرد در مقایسه با سایر روش‌های دیگر رشد و توسعه سریعی داشته است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن این روش و همچنین قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. فرآیند پیوند سرد نوردی توسط محققین با اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد¹ [3,2] پیوند به وسیله نورد سرد² [4] پوشش به وسیله نورد³ [5] پیوند نورد سرد [7,6] معرفی شده است. پیوند سرد نوردی، نوعی جوش کاری حالت جامد می‌باشد، که پیوند آن بر اثر تغییرشکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات پیوند ایجاد می‌شود [8-10]. در این روش پیوند زمانی ایجاد می‌شود که انبساط سطحی در سطوح ورق‌ها ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار باید به اندازه کافی زیاد باشد به طوری که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود که این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [12-10,8]. این فرآیند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، علاوه بر این فلزاتی که به وسیله جوش سنتی نمی‌توان به هم جوش زد را می‌توان با این روش بهم اتصال داد [1]. در اوایل سال‌های ابداع این روش، آن‌را به عنوان یک روش امیدبخش برای تولید انبوه ورق و فویل قلمداد می‌کردند [14,13]. مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای حاکم باند به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال انجام شده است، و شرایط روند به خوبی تعریف شده است. گزارش شده است که پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [17-15,12,11,7]، درجه حرارت اتصال [16,9]، زمان آنیلینگ قبل و بعد از فرآیند [19-17]، سرعت نورد [17,16] ضخامت اولیه [17,16]، جهت نورد [17]، و حضور ذرات بین ورق [21,20] می‌باشد همچنین نورد سرد پیوندی به منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، از قبیل آلومینیوم [1]، فولاد [22]، مس [23]، کامپوزیت آلومینیوم-مس [24]، کامپوزیت آلومینیوم-تیتانیوم [25]، کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم [26]. یکی از پارامترهای مهم مواد در زمینه شکست و طراحی سازه، چقرمگی شکست می‌باشد که عبارت است میزان انرژی مورد نیاز برای توسعه ترک در یک ماده. بررسی و محاسبه چقرمگی شکست به منظور پیش‌بینی عمر و رشد ترک در قطعات دارای ترک می‌باشد. استحکام شکست در حالت تنش صفحه‌ای علاوه بر این که تابع ضخامت است تابع درجه حرارت و نرخ بارگذاری نیز می‌باشد همچنین مقادیر آن می‌تواند با تغییر طول اولیه ترک نیز تغییر نماید. (منحنی آر⁴) روشی برای تعیین مقاومت شکست مواد در طی رشد آرام و پایدار ترک است. این روش چگونگی افزایش استحکام به شکست را با افزایش بار وارده به نمونه ترک‌دار طی رشد آرام ترک در حالت تنش صفحه‌ای ترسیم می‌کند. در واقع منحنی آر بیانگر تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب طول ترک خواهد بود.

قابل ذکر است که در مقایسه ورق‌های تولیدی با روش پیوند سرد نوردی و ورق تک‌لایه نورد شده تفاوت‌های وجود دارد، که مثلاً وقتی از یک ورق تک لایه استفاده شود، ضخامت نهایی نمونه‌ی تولیدی در پایان هر سیکل نورد به میزان کاهش مورد نظر، کاهش ضخامت می‌یابد و نمونه‌ی اولیه و نورد شده به اندازه‌ی کاهش ضخامت مورد نظر، اختلاف ضخامت دارند که در این صورت مقایسه خواص مکانیکی و شکست نمونه‌ی آنیل شده و نمونه‌ی نورد شده به دلیل اختلاف در ضخامت کار درستی نمی‌باشد، اما در کار حاضر که نمونه‌ی تولید شده و نمونه‌ی آنیل شده ضخامت یکسان دارد، متفاوت است و می‌توان

¹ Cold pressure welding by rolling

² Bonding by cold rolling

³ Clad Sheet by Rolling

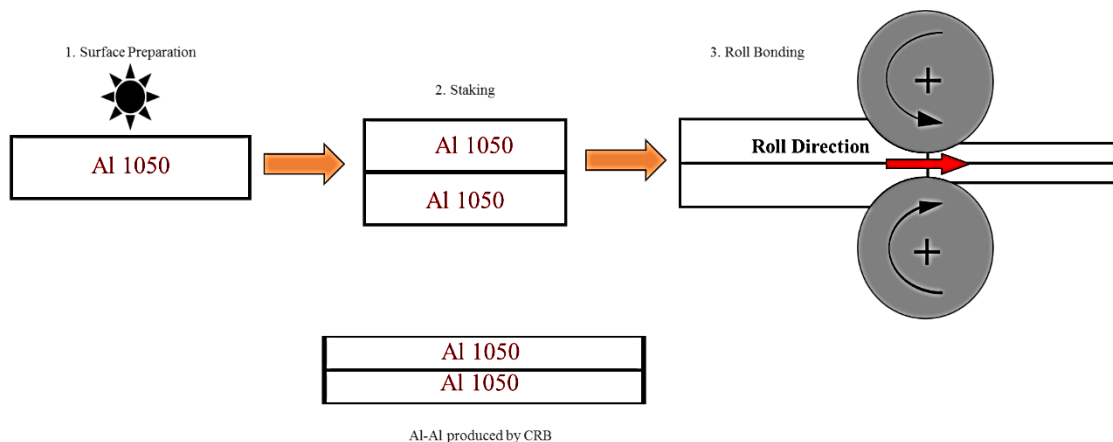
⁴ R curve

⁵ Sever plastic deformation (SPD)

⁶ ASTM E8/E8M-9

Table 1 Specifications of commercial purity aluminum

جدول 1 ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مواد تحقیق				
ماده	ترکیب شیمیایی (%)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	ازدیاد طول (%)	میکروسختی (ویکرز)
آلومینیوم 1050	99.44 Al, 0.406 Fe, 0.121 Si, 0.033 Cu	39	35	25



Al-Al produced by CRB

Fig.1 Schematic illustration of CRB process

شکل 1 شماتیک فرآیند نورد سرد پیوندی

شدن از راستای بارگذاری را داشته باشند. قیدوندها بر طبق (استاندارد ای 399³) برای نمونه‌های کششی فشرده، انتخاب طراحی و ساخته شدند. "شکل‌های 3 و 4" شماتیک نحوه قرار گرفتن نمونه‌های کششی فشرده، پین و قیدوندهای ساخته شده را نشان می‌دهد. توجه شود که نمونه‌های آماده شده برای به‌دست آوردن چقرمگی شکست در مود اول می‌باشد. همه‌ی نمونه‌ها تحت کنترل جابه‌جایی، تحت بارگذاری شبه استاتیکی، با سرعت 0.5 mm/min و با استفاده از دستگاه سنتم انجام شد. "شکل 5" مجموعه آزمایش چقرمگی شکست را نشان می‌دهد.

3- نتایج و بحث

3-1- شکست‌نگاری

در قسمت (a) و (b) "شکل 6" ورق اولیه و آنیل شده نشان‌دهنده، شکست از

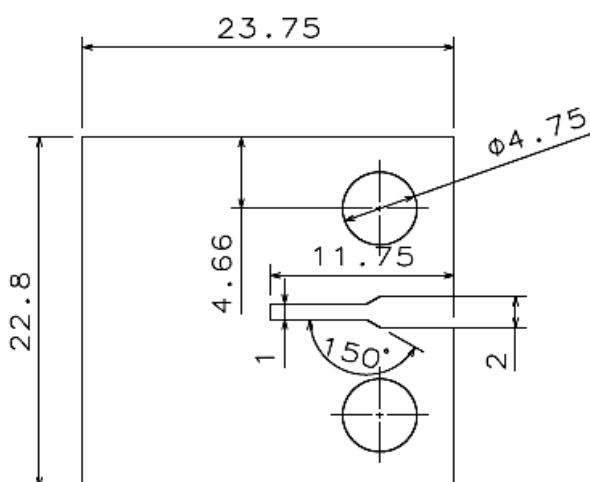


Fig.2 Map and dimensions of CT specimens

شکل 2 نقشه و ابعاد نمونه‌های کششی فشرده

از انجام آزمون میکروسختی، جهت تسهیل در جابه‌جایی نمونه‌ها از مانت سرد استفاده شد. پس از مانت نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه گردان پولیش و با استفاده از سنباده‌های 800، 1000 و 1200 پرداخت شد. میکروسختی برای هر نمونه به صورت رندوم در بیش از 10 نقطه مختلف اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد. سطح نمونه‌های شکست، پس از انجام آزمون کشش تک محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین مکانیزم شکست در سیکل‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، (مدل و گاتسکان) مورد بررسی قرار گرفت.

4-2- آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای

به منظور بررسی چقرمگی شکست برای نمونه‌ی اولیه و دولایه نورد شده، از هر ورق، سه نمونه مشابه برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد که مطابق با (استاندارد ای 647¹)، (نمونه‌های کششی فشرده²) با استفاده از ماشین وایرکات آماده شد. در ابتدا نمونه‌ها براساس "شکل 2" و در ابعاد 23.75×22.8×1 میلی‌متر در راستای عمود بر جهت نورد بریده شدند، سپس در این نمونه‌ها یک شیار نازک با عرض 1 و طول حدود 8 میلی‌متر به وسیله ماشین وایرکات ایجاد شد. همچنین این شیار به یک ناچ وی شکل با زاویه 60 درجه ختم می‌شود و پس از آن به اندازه 1 میلی‌متر و عرض 0.25 میلی‌متر گسترش یافت. این شیار با استفاده از ماشین وایرکات با قطر سیم 0.2 میلی‌متر ایجاد شد. این تکنیک ایجاد و گسترش ترک اولین بار توسط موارد [28] و پس از آن توسط محمدی [29] استفاده شد. نسبت $a_0/w = 0.4$ یکسان برای همه‌ی نمونه‌ها ایجاد شد. قید و بندها و پین‌هایی که در آزمایش از آن‌ها استفاده شده و نمونه به کمک آن‌ها نگه‌داشته شدند، باید صلب بوده و به‌گونه‌ای باشند که در حین بارگذاری، تغییر شکل آن‌ها خطایی در آزمون ایجاد نکند. همچنین نباید در حین آزمایش، امکان پیچیدن نمونه و خارج

¹ ASTM E647² Ct sample³ ASTM E-399

تولید شده به روش پیوند سرد نوردی و آلومینوم آنیل شده اولیه در "شکل 7" آورده شده است. استحکام کششی و تنش تسلیم ورق دولایه آلومینیوم-آلومینیوم نسبت به نمونه آنیل شدیداً افزایش می‌یابد و استحکام تسلیم و کششی به ترتیب از مقادیر 39 و 61 مگاپاسکال به 121 و 153 مگاپاسکال برای ورق دولایه آلومینیومی می‌رسد. این افزایش شدید را می‌توان به وسیله کار سرد، کاهش ضخامت بالا (50٪)، کارسختی به وسیله ناهنجاری توجیه کرد [30-36]. به‌طور خلاصه می‌توان گفت اعمال کار سرد همواره همراه افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری بوده است و در کار حاضر نیز، همین عامل باعث افزایش شدید استحکام کششی شده است.

"شکل 8" تغییرات ازدیاد طول، استحکام تسلیم و استحکام نهایی را نشان می‌دهد که در فرآیند پیوند سرد نوردی مقدار ازدیاد طول کاهش یافته است و کار سرد، دارای بیشترین اثر بر کاهش ازدیاد طول کششی است [30-35]. مقدار پایین ازدیاد طول در نمونه‌ها می‌تواند ناشی از همان دلایلی باشد که باعث افزایش استحکام و میکروسختی شد [30,37].

"شکل 9" تغییرات میکروسختی ویکرز برای ورق دولایه آلومینیوم-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی و آلومینوم آنیل شده اولیه نشان می‌دهد. در نمودار واضح است میکروسختی ورق دولایه آلومینیوم-آلومینیوم نسبت به نمونه آنیل شدیداً افزایش می‌یابد و مقدار میکروسختی از 25 ویکرز برای نمونه آنیل به 45 ویکرز برای نمونه دولایه آلومینیوم-آلومینیوم می‌رسد که این افزایش شدید به دلیل اعمال کرنش سختی و کار سرد می‌باشد.

3-3- چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای

پس از انجام آزمایش چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای، باید طول ترک به صورت پیوسته و در نیروهای مختلف اندازه‌گیری شود. طبق (استاندارد ای 647)¹، دو روش برای اندازه‌گیری طول ترک در حین انجام تست وجود دارد:

- روش بصری
- روش اختلاف پتانسیل الکتریکی

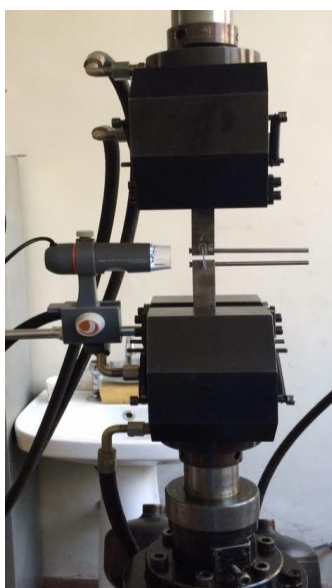


Fig.5 Experimental set-up

شکل 5 مجموعه آزمایش چقرمگی شکست

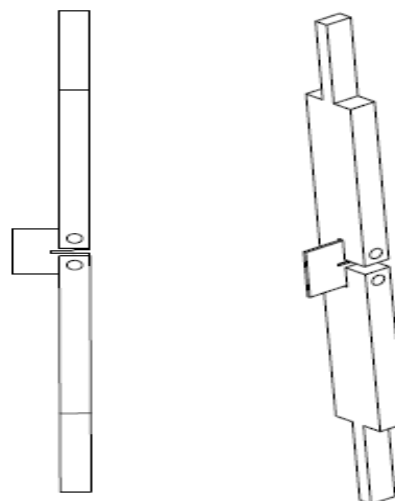


Fig.3 Schematic of how to place fixture and CT specimens

شکل 3 شماتیک نحوه قرار گرفتن قید و بند و نمونه‌های CT



Fig.4 Fixtures made for fracture test

شکل 4 قید و بند ساخته شده برای آزمایش شکست

نوع نرم همراه با میکروحفرات و منطق برشی خارجی است به طوری که تغییر شکل بالا و گلوپی شدن در حالت ماکروسکوپی قابل مشاهده است. بعد از فرآیند پیوند جوش نوردی در شکل‌های (b) دیده می‌شود که نمونه‌های شکست نرم همراه با میکروحفرات و مناطق برشی را نشان می‌دهند. قابل توجه است که میزان تغییر شکل کم و گلوپی شدن بسیار کوچک رخ داده است که نتایج اعمال کرنش زیاد، کار سرد و افزایش چگالی ناهنجاری در هنگام تولید ورق دولایه آلومینیومی با فرآیند پیوند سرد نوردی می‌باشد. مطابق با قسمت (c) و (d) "شکل 6" مشاهده می‌شود که اندازه میکروحفرات ایجاد شده در پیوند جوش نوردی کوچکتر از میکروحفرات موجود در ماده اولیه بوده و به اندازه آن عمیق نمی‌باشد که می‌تواند تایید کننده نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره برای نمونه‌ی دو لایه (افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول) باشد.

3-2- خواص مکانیکی

نمودارهای تنش-کرنش مهندسی برای ورق دو لایه آلومینیوم-آلومینیوم

¹ ASTM E-647

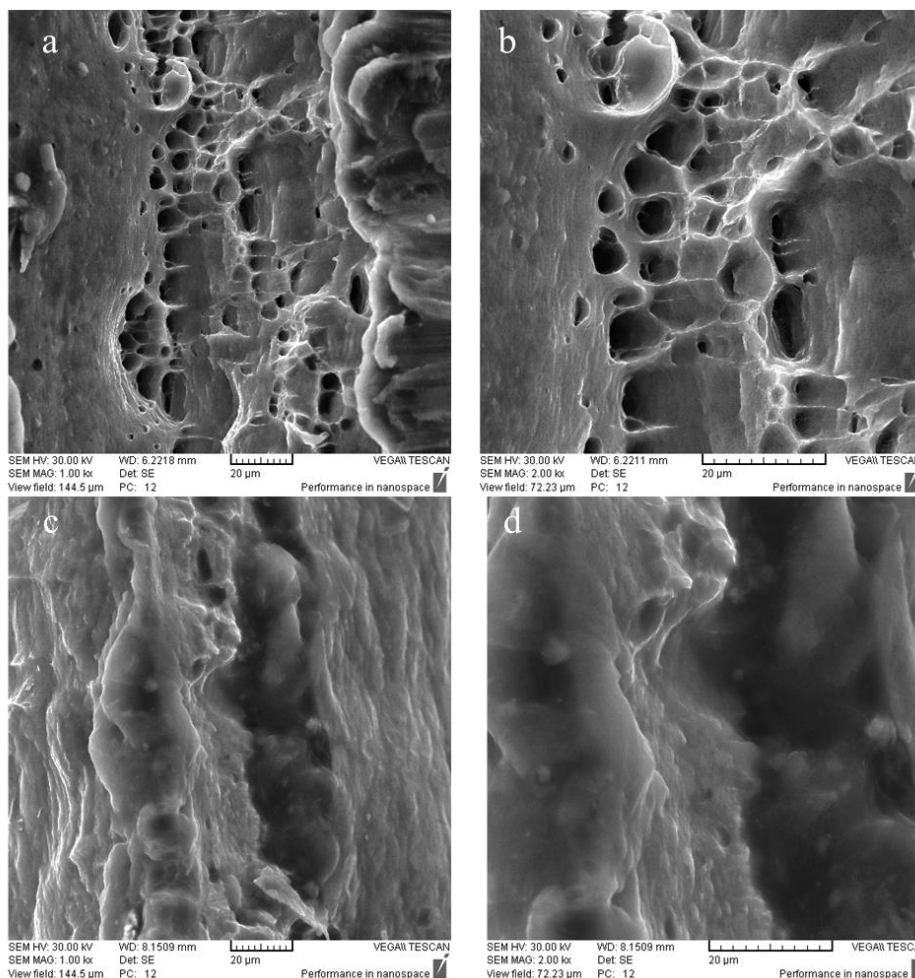


Fig.6 Image of SEM from fracture surfaces (a) and (b) annealed sample, (c) and (d) CRBed sample

شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقاطع شکست a و b) نمونه آنبیل شده c و d) نمونه پیوند نوردی

طول ترک ترسیم می‌شود. و مقاومت به رشد ترک با افزایش نیرو و طول ترک افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات (فاکتور شدت تنش اعمال شده)³ برحسب تغییرات طول ترک در نیروهای ثابت نیز به وسیله خط‌چین ترسیم می‌شود. در تحقیق حاضر نیز از این روش برای محاسبه چقرمگی شکست استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

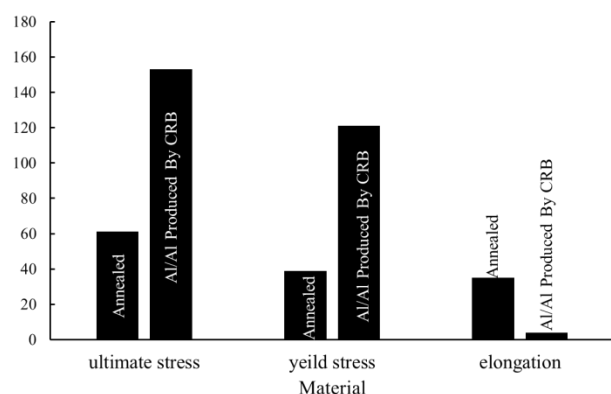


Fig. 8 variations of tensile, yield strength and elongation for annealed and two layers of aluminum sheets produced by CRB process

شکل 8 تغییرات استحکام، تنش تسلیم و ازدیاد طول برای نمونه‌ی آنبیل شده و دولا یه آلومینیومی تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

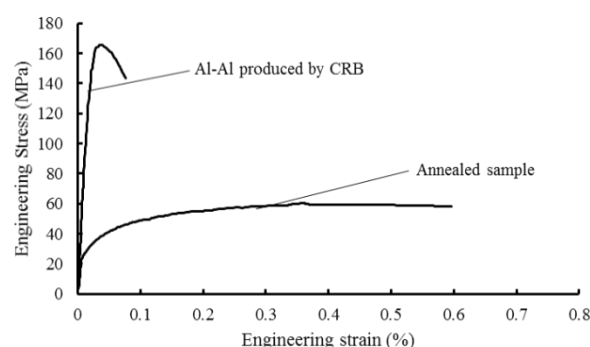


Fig. 7 engineering stress-strain curves for annealed and two layers of aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding Process

شکل 7 منحنی تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌ی آنبیل شده و دولا یه آلومینیومی تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

که در این پژوهش، اندازه‌گیری رشد ترک به صورت بصری و با استفاده از میکروسکوپ (مدل سلسترون¹) انجام شده است. "شکل 10"، نمونه‌ی استفاده شده، قبل و بعد از آزمایش موردنظر را نشان می‌دهد.

در این پژوهش مطابق با (استاندارد ای 561²) و به منظور محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای نمونه‌ها از منحنی آر استفاده شد. در روش منحنی آر، در یک طول ترک، تغییرات مقاومت به رشد ترک برحسب تغییر

³ Kapplied

¹ Celestron

² ASTM E561

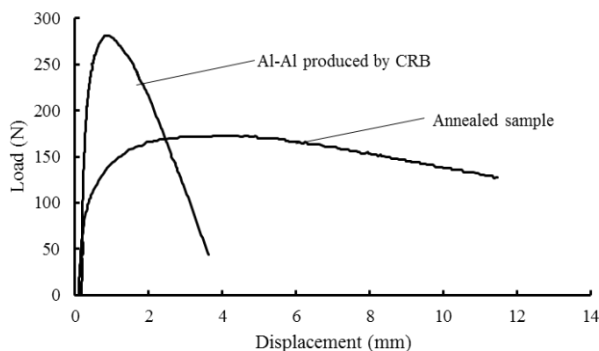


Fig. 11 Load-displacement curve in the fracture test of annealed specimen and two layers of aluminum sheets produced by CRB process
 شکل 11 نمودار نیرو-جابجایی در آزمون شکست برای نمونه‌ی اولیه و دولایه تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

می‌باشد. این بدان معناست که در لحظه‌ای که سطح فاکتور شدت تنش در قطعه، برابر میزان مقاومت شکست ماده می‌شود رشد ترک به صورت ناپایدار آغاز می‌گردد. همان‌طور که از "شکل‌های 12 و 13" نیز مشاهده می‌شود، در یک جز افزایش بعد از نقطه تماس، مقدار فاکتور شدت تنش اعمال شده از مقاومت ماده بیشتر می‌شود که مبین رشد ناپایدار ترک است. نمودار مشکی رنگ، نمودار آر و نمودارهای خط چین، نمودار فاکتور شدت تنش اعمال شده در نیروهای مختلف و ثابت می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ذکر شده مشخص است، مقدار چقرمگی شکست برای هر نمونه از تماس بین منحنی آر و شدت تنش اعمال شده در نیروی ثابت بدست می‌آید. براساس "جدول 2" که در آن نتایج حاصل از محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای نیز

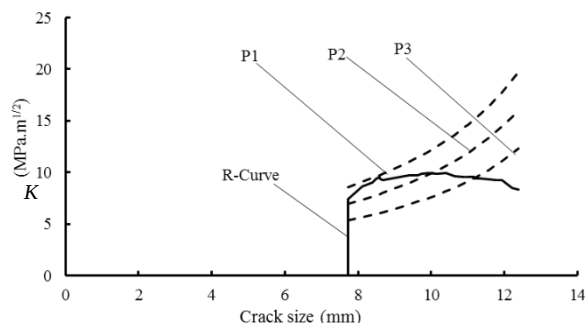


Fig. 12 R curve for annealed sample
 شکل 12 منحنی آر برای نمونه‌ی آلومینیوم آنیل شده

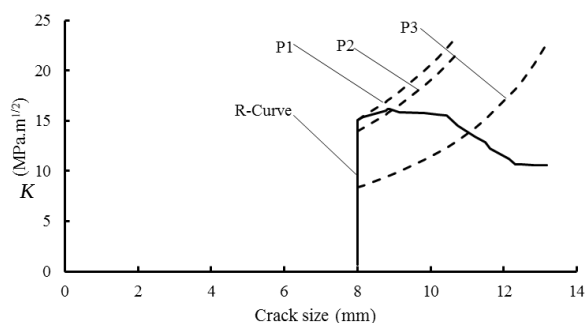


Fig. 13 R curve for two layers of aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding Process
 شکل 13 منحنی آر برای نمونه‌ی دولایه آلومینیومی تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

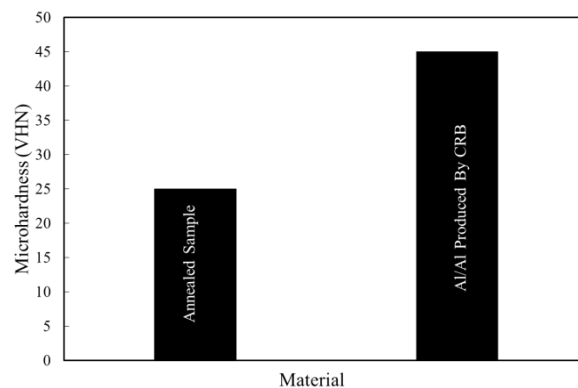


Fig. 9 micro hardness values for annealed and two layers of aluminum sheets produced by CRB process

شکل 9 میکروسختی ویکرز برای نمونه‌ی آنیل شده و دولایه آلومینیومی تولید شده به روش نورد سرد پیوندی



Fig. 10 CT specimens before and after fracture test
 شکل 10 نمونه‌های کششی فشرده قبل و بعد از آزمون شکست

همان‌طور که اشاره شد، چقرمگی شکست از محل تماس دو نمودار مقاومت به رشد ترک و فاکتور شدت تنش اعمال شده محاسبه می‌شود. مقدار مقاومت به رشد ترک با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود. همچنین مقدار فاکتور شدت تنش اعمال شده در چند نیروی ثابت و برحسب تغییرات طول ترک ترسیم می‌شود. محل تماس بین منحنی‌های فاکتور مقاومت به رشد ترک و شدت تنش اعمال شده، چقرمگی شکست یا فاکتور شدت تنش بحرانی برای نمونه‌ی موردنظر می‌باشد.

$$k_{r_i} = \frac{p_i}{b\sqrt{w}} \times f_i\left(\frac{a}{w}\right)$$

$$f_i\left(\frac{a}{w}\right) = \left[\frac{2 + \frac{a}{w}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{w}\right) - 13.32\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{w}\right)^4 \right]$$

رابطه بالا برای $\frac{a}{w} \geq 0.35$ صادق می‌باشد.

"شکل 11"، نمودار نیرو-جابجایی را برای نمونه‌های آنیل شده و دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی نشان می‌دهد. جابه‌جایی نمودار، جابه‌جایی دهانه ترک در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل واضح است که نیروی گسترش ترک موجود برای نمونه دو لایه به مراتب بیشتر از نمونه‌ی آنیل شده است.

چقرمگی شکست برای هر نمونه با استفاده از معادلات بالا و براساس استاندارد ای 561 محاسبه شد. نمودار آر برای نمونه‌های اولیه و دولایه در "شکل‌های 12 و 13" ترسیم شده است. نقاط تماس بین منحنی‌های آر و خطوط خط‌چین، مقادیر فاکتور شدت تنش بحرانی در طول ترک موردنظر

Table 2 Results of mechanical properties and fracture tests

جدول 2 نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی و شکست					
ماده	چقرمگی شکست (مگاپاسکال متر ^{1/2})	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	میکروسختی (ویکرز)	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (مگاپاسکال)
نمونه‌ی اولیه	10.7	179	25	35	61
آلومینیوم-آلومنیوم					
تولید شده با روش	16.2	311	45	4	163
پیوند نوردی					
درصد تغییرات	51	74	80	-88	167

- Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002.
- [7] D. Pan, K. Gao, J. Yu, Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips, *Materials Science and Technology*, Vol. 5, No. 9, pp. 934-939, 1989.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] H. Le, M. Sutcliffe, P. Wang, G. Burstein, Surface oxide fracture in cold aluminium rolling, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 4, pp. 911-920, 2004.
- [11] N. Lukaschkin, A. Borissow, A. Erlikh, The system analysis of metal forming technique in welding processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 264-269, 1997.
- [12] H.-Y. Wu, S. Lee, J.-Y. Wang, Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, No. 1, pp. 173-179, 1998.
- [13] J.-G. Luo, V. L. Acoff, Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 379, No. 1, pp. 164-172, 2004.
- [14] C. Barlow, P. Nielsen, N. Hansen, Multilayer roll bonded aluminum foil: processing, microstructure and flow stress, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 13, pp. 3967-3972, 2004.
- [15] M. Quadir, A. Wolz, M. Hoffman, M. Ferry, Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminum strip, *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 11, pp. 959-962, 2008.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] C. Lu, K. Tieu, D. Wexler, Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 10, pp. 4830-4834, 2009.
- [21] 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.
- [22] 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, 1999.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] R. Jamaati, M. Toroghinejad, Cold roll bonding bond strengths: review, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
- [28] A. Mourad, M. Alghafri, O. A. Zeid, S. Maiti, Experimental investigation on ductile stable crack growth emanating from wire-cut notch in AISI 4340 steel, *Nuclear engineering and design*, Vol. 235, No. 6, pp. 637-647, 2005.
- [29] B. Mohammadi, M. Tavoli, F. Djavanroodi, Effects of Constrained Groove Pressing (CGP) on the plane stress fracture toughness of pure copper, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 52, No. 5, pp. 957-969, 2014.
- [30] R. Jamaati, S. Amirkhanlou, M. R. Toroghinejad, B. Niroumand, Effect of

مشخص است مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه‌ی اولیه و دولایه تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به ترتیب 10.7 و 16.2 می‌باشد که بیانگر بهبود 51٪ در چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای می‌باشد. همان‌طور که مشخص است اعمال کار سرد، افزایش استحکام و سختی می‌تواند از دلایل افزایش چقرمگی شکست برای نمونه‌ی دولایه آلومینیومی در مقایسه با نمونه‌ی آنیل شده آن باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نمونه‌ی دو لایه‌ی آلومینیومی با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی تولید شد و خواص مکانیکی، شکست نگاری بررسی شد. همچنین در این تحقیق، برای اولین بار، چقرمگی شکست تنش صفحه‌ی تحت بارگذاری در مود اول برای نمونه‌های استاندارد کششی فشرده که با استفاده از ماشین وایرکات آماده شد، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- 1- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از سطح مقطع شکست بیانگر ایجاد پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی می‌باشد. همچنین با اعمال کار سرد و کرنش زیاد، میکروکلافات در مقطع شکست کم‌عمق تر و کوچک‌تر شده‌اند که بیانگر افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری در مقایسه با نمونه‌ی آنیل شده می‌باشد.
- 2- نتایج حاصل از بررسی خواص مکانیکی نشان می‌دهد که میکروسختی و استحکام کششی به‌شدت افزایش یافته و مقدار ازدیاد طول کاهش می‌یابد که عمده دلیل این رفتار اعمال نرخ کرنش زیاد و افزایش چگالی ناهنجاری‌ها می‌باشد.
- 3- چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی دولایه تولید شده به روش پیوند نوردی برابر 16.2 می‌باشد و در مقایسه با نمونه‌ی آنیل شده حدود 51٪ افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند ناشی از افزایش استحکام و سختی نمونه‌ی دولایه نسبت به نمونه‌ی آنیل شده باشد.

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] C. Clemensen, O. Juelstorp, N. Bay, Cold welding. Part 3: influence of surface preparation on bond strength, 1986.
- [3] P. Wright, D. Snow, C. Tay, Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling, *Metals Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 24-31, 1978.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, Cold roll bonding of 5754-aluminum strips,

- process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta Materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
- [35] M. Alizadeh, M. Paydar, Fabrication of nanostructure Al/SiC P composite by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 492, No. 1, pp. 231-235, 2010.
- [36] S. Amirkhanlou, M. R. Rezaei, B. Niroumand, M. R. Toroghinejad, Refinement of microstructure and improvement of mechanical properties of Al/Al₂O₃ cast composite by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 6, pp. 2548-2553, 2011.
- [37] 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. (in Persian فارسی).
- particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 4, pp. 2143-2148, 2011.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, Novel ultra-high straining