مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1396، دوره 17، شماره 3، ص‌ص 451-454

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی شکل‌پذیری ورق‌های آلومینیومی تولید شده با فرآیند پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون ناکازیما

داود رحمت آبادی[1]، رامین هاشمی[2*]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی
دریافت: 13 بهمن 1395
پذیرش: 09 اسفند 1395
ارائه در سایت: 14 فروردین 1396

کلید واژگان:
ورق آلومینیومی
پیوند سرد نوردی
نمودار حد شکل‌پذیری
خواص مکانیکی
میکروسکوپ الکترونی روبشی

چکیده

فرآیند پیوند سرد نوردی، یک جوش حالت جامد برای ایجاد پیوند بین فلزات مشابه و غیرهم‌جنس از طریق نوردکاری می‌باشد. دراین تحقیق، برای اولین‌بار شکل‌پذیری ورق‌های دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند نوردی با استفاده از آزمایش ناکازیما مورد مطالعه قرارگرفت. به‌منظور ساخت ورق‌دولایه آلومینیومی، از یک ماشین‌نورد و اعمال کاهش‌ضخامت 50٪ در دمای اتاق استفاده شد. همچنین خواص مکانیکی، و سطح مقاطع شکست مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد که استحکام و میکروسختی به‌ترتیب 149.5 و 80٪ افزایش داشت. اما ازدیادطول و شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌های اولیه به‌دلیل کارسرد و کرنش‌سختی کاهش یافت. همچنین نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترون‌روبشی نشان داد که بعد از فرآیند نورد سرد پیوندی در نمونه‌ی دولایه آلومینیومی، شکست نرم همراه با میکروحفرات و مناطق‌برشی مشاهده می‌شود.

Experimental investigation of formability of aluminum sheets produced by cold roll bonding process used by Nakazima test

Davood Rahmatabadi, Ramin Hashemi*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Research Note
Received 01 February 2017
Accepted 27 February 2017
Available Online 03 April 2017

Keywords:
Aluminum sheet
CRB
FLD
Mechanical properties
SEM

ABSTRACT

Cold roll bonding process is a solid phase method of bonding the same or different metals by rolling. In this study, for the first time, formability of two-layer aluminum strips fabricated by the CRB process is investigated by Nakazima and experimental tests. To produce two-layer aluminum strips using a rolling machine and applying thickness reduction was 50% at room temperature. Mechanical properties, tensile fracture surfaces were studied and compared. It was observed that strength and microhardness increased 149.5 and 80% respectively, but elongation and ductility decreased compared to the initial strip due to strain hardening and cold work. Also, results of SEM demonstrated that after CRB process, ductile fracture accompanied by dimples samples and shear zones were observed.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر آلیاژهای لایه‌ای بیش از گذشته در کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلیاژهای چندلایه، روش نورد سرد پیوندی در سال‌های اخیر به‌دلیل ویژگی‌های کاربردی منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش‌های دیگر رشد و توسعه سریعی داشته است [2]. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن این روش و همچنین قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. این فرآیند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، علاوه‌بر این فلزاتی که به‌وسیله جوش سنتی نمی‌توان به هم جوش زد را می‌توان با این روش بهم اتصال داد [3,1]. در سال‌های اخیر از فرآیند پیوند سرد نوردی به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل لایه‌ای بزرگ استفاده می‌شود [1]. مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای حاکم باند به‌منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال انجام شده است، همچنین نورد سرد پیوندی به‌منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است.

در حالت کلی، شکل‌دهی ورق‌های فلزی عبارت است از انجام یک تغییر شکل پلاستیک که روی ورق انجام می‌پذیرد تا یک قطعه مهندسی با شکل دلخواه تولید گردد. منحنی‌های حد شکل‌دهی در حقیقت محدوده‌ی ترکیب کرنش‌هایی است که شروع گلویی موضعی را مشخص می‌کند [4]. ناکازیما و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

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 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.55.9]

همکاران [5] روشی برای ترسیم نمودارهای حد شکل‌پذیری پیشنهاد نمودند که در آن نمونه‌هایی مستطیلی با کمک سنبه نیم کروی شکل داده می‌شوند و هر دو طرف نمودار را می‌توان با این روش ترسیم نمود و امروزه حتی باوجود مشکلات و دشواری‌های آن، پرکاربردترین شیوه به‌دست آوردن نمودارهای حد شکل‌دهی در میان پژوهشگران می‌باشد. شاید به خاطر بروز همین مشکلات بوده است که با توجه این که روش آزمون ناکازیما که کامل‌ترین و پرکاربردترین روش می‌باشد ولی تاکنون از این روش برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه، استفاده چندانی نشده است. کرجی بانی و همکاران با استفاده از آزمون ناکازیما به بررسی شکل‌پذیری ورق دولایه آلومینیوم مس پرداختند [6].

قابل ذکر است که در مقایسه ورق‌های تولیدی با روش پیوند سرد نوردی و ورق تک‌لایه نورد شده تفاوت‌های وجود دارد، مثلا وقتی از یک ورق تک لایه استفاده شود، ضخامت نهایی نمونه‌ی تولیدی در پایان هر سیکل نورد به میزان کاهش موردنظر، کاهش ضخامت می‌یابد و نمونه‌ی اولیه و نورد شده به اندازه‌ی کاهش ضخامت موردنظر، اختلاف ضخامت دارند.

2- روش تحقیق

2-1- فرآیند پیوند سرد نوردی

در این پژوهش از آلومینیوم خالص تجاری 1050 استفاده شده است. دلیل این کار، عدم نیاز به تجهیزات شکل‌دهی با توان بالا می‌باشد. همچنین به دلیل محدودیت در، باید از ماده‌ای با استحکام پایین استفاده می‌شد که امکان تولید نمونه از نظر ابعاد جهت استفاده در آزمون استاندارد ناکازیما را داشته باشد. قبل از انجام عملیات نورد تجمعی نمونه‌ها تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. عملیات آنیل به مدت یک ساعت و در دمای 380 درجه سانتی‌گراد و در کوره‌ی صورت گرفت. به منظور تولید ورق دولایه آلومینیومی به روش پیوند سرد نوردی، ابتدا دو قطعه از ورق اولیه با استفاده از حمام استون چربی زدایی شده و توسط برس فولادی خراشیده و زبر می‌شوند [7] 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. شماتیک فرآیند پیوند نوردی در "شکل 1" نشان داده شده است.

2-2- بررسی خواص مکانیکی سطح مقطع شکست و نمودارهای حد شکل‌پذیری

آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش $1\times10^{-4}\ s^{-1}$ انجام شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه‌ها تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین مکانیزم شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. جهت تعیین نمودار حد شکل‌دهی از آزمون ناکازیما استفاده شد. این آزمون شامل کشش نمونه تا پارگی با استفاده از سنبه سر نیم کروی و قالب می‌باشد. برای آزمون 8 نمونه در طول یکسان و عرض‌های مختلف براساس استاندارد ISO 12004 و استفاده از مقیاس یک‌چهارم استفاده شد. بعد از آماده‌سازی، برای یافتن کرنش‌های حدی، گریدهای دایروی به قطر 2.5 میلی‌متر به کمک حک الکتروشیمیایی روی نمونه‌ها حک شدند. پس از انجام آزمون ناکازیما، جهت ترسیم نمودار کرنش‌های ایجاد شده در نمونه‌ها را به‌وسیله میکروسکوپ ورنیه‌دار استفاده شده مطابق با "شکل 2" با دقت 1 میکرومتر اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری مقادیر مقادیر قطرهای ثانویه بزرگ و کوچک بیضی می‌باشند و داشتن مقادیر اولیه قطر دایره و استفاده از روابط مربوطه مقادیر کرنش‌های حقیقی و مهندسی حدی محاسبه می‌شود. با محاسبه مقادیر کرنش بزرگ و کوچک برای تمام نمونه‌های آزمون ناکازیما، نقاطی به‌دست می‌آید که با عبور منحنی از این نقاط نمودار حد شکل‌دهی حاصل می‌گردد.

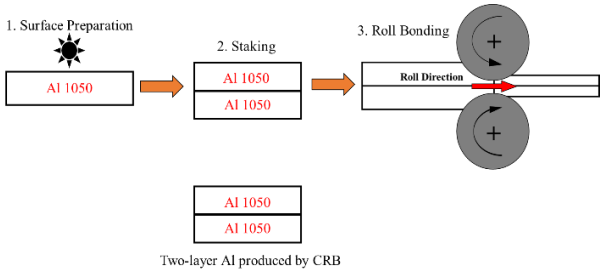


Fig.1 Schematic illustration of CRB process

شکل 1 شماتیک فرآیند پیوند سرد نوردی

3- نتایج و بحث

3-1- شکست نگاری

در "شکل 3" سطح مقطع شکست ورق اولیه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شکست از نوع نرم همراه با میکروحفرات و منطق برشی خارجی است به‌طوری که تغییر شکل بالا و گلویی شدن در حالت ماکروسکوپی قابل مشاهده است.

با توجه به تصاویر "شکل 4" و بعد از فرآیند پیوند جوش نوردی دیده می‌شود که نمونه‌های شکست دارای شکست نرم همراه با میکروحفرات و

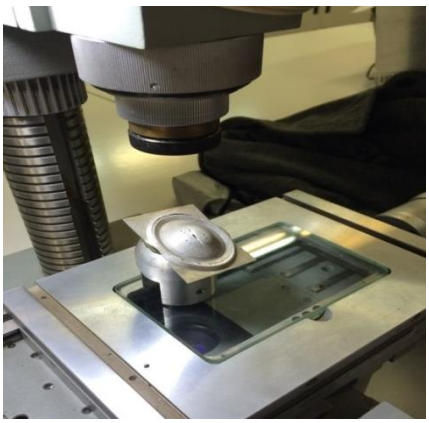


Fig.2 traveling microscopy used to reading minor and major strain

شکل 2 میکروسکوپ ورنیه‌دار استفاده شده جهت خواندن کرنش‌های اصلی و فرعی

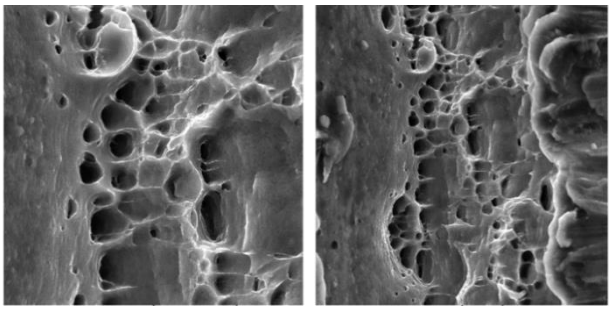


Fig.3 Tensile fracture surfaces of initial sample

شکل 3 سطح مقطع شکست نمونه اولیه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.55.9]

مناطق برشی هستند. قابل توجه است که میزان تغییر شکل کم و گلویی شدن بسیار کوچک رخ داده است که نتایج اعمال کرنش زیاد، کار سرد و افزایش چگالی نابه‌جایی در هنگام تولید با فرآیند پیوند سرد نوردی می‌باشد. همچنین مطابق با هر دو "شکل 3 و 4" 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. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع شکست، بیانگر پیوند مناسب و عدم انفصال بین لایه‌های آلومینیومی می‌باشد.

3-2- خواص مکانیکی و شکل‌پذیری

نمودارهای تنش-کرنش مهندسی در "شکل 5" ارائه شده است. استحکام کششی و تنش تسلیم ورق دولایه آلومینیومی نسبت به نمونه آنیل شدیداً افزایش می‌یابد و استحکام تسلیم و کششی به ترتیب از مقادیر 39 و 61 مگاپاسکال به 121 و 153 مگاپاسگال برای ورق دولایه آلومینیومی می‌رسد. همچنین استحکام تسلیم و کششی برای نمونه‌ی دولایه تولید به روش پیوند سرد نوردی در مقایسه با ورق اولیه آلومینیوم خالص تجاری، به ترتیب 210٪ و 149.5٪ افزایش یافته است. همان‌طور که اشاره شد، این افزایش شدید را می‌توان به‌وسیله کار سرد، کاهش ضخامت بالا (50٪)، کارسختی به وسیله نابه‌جایی توجیه کرد [8-10]. همچنین این افزایش استحکام با تایید تصاویر میکروسکوپ الکترونی بیانگر پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیومی و عدم جدایش بین لایه‌ها می‌باشد.

در "شکل 6" نمودارهای حد شکل‌پذیری برای هر دو نمونه آنیل و دولایه‌ی آلومینیومی تولید شده، به‌منظور مقایسه شکل‌پذیری در یک شکل آورده شده است و همان‌طور که مشخص است، سطح زیر نمودار حد شکل‌پذیری مانند نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره که ازدیاد طول برای نمونه‌های دولایه آلومینیومی در مقایسه با نمونه‌های آنیل شده به شدت کاهش می‌یابد، پایین آمد که این پایین آمدن نمودار به معنی محدودتر شدن عملیات شکل‌پذیری برای نمونه‌های دولایه تولید شده به روش پیوند سرد پیوندی می‌باشد که می‌توان عامل اصلی این کاهش شکل‌پذیری و ازدیاد طول را وجود کار سرد در حین عملیات نورد و کرنش سختی بالا به دلیل کاهش ضخامت و تغییرشکل شدید پلاستیک در نظر گرفت. البته نکته قابل تامل مقایسه مقادیر ازدیاد طول و پایین‌ترین نقطه در نمودار حد شکل‌پذیری می‌باشد. کاهش شکل‌پذیری برای نمونه‌ی دولایه با توجه به روش تولید آن که کارسرد همراه با کرنش زیاد می‌باشد طبیعی است، اما نتایج حاصل از آزمون کشش که حاکی از کاهش 90٪ ازدیاد طول می‌باشد، شکل‌پذیری را برای نمونه‌های تولیدی یا روش پیوند سرد نوردی محدودتر می‌کند. از طرف دیگر نمودارهای حد شکل‌پذیری، شکل‌پذیری تحت بارگذاری‌های مختلف را نمایش می‌دهد و به نوعی کامل‌ترین آزمون تجربی برای ارزیابی شکل‌پذیری

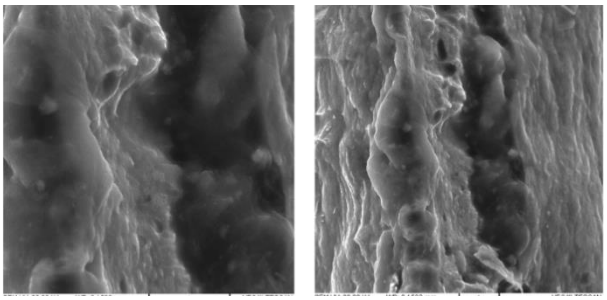


Fig.4 Tensile fracture surfaces of Al Produced by CRB

شکل 4 سطح مقطع شکست ورق آلومینیومی تولید شده با پیوند سرد نورد

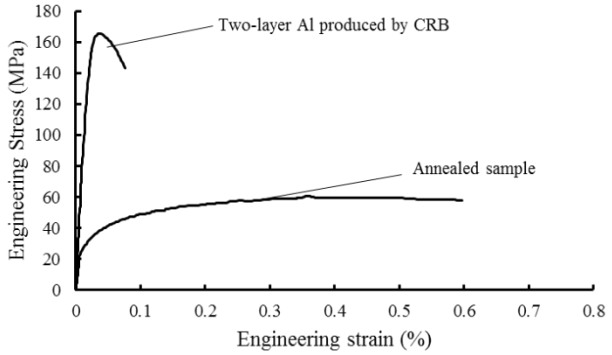


Fig. 5 engineering stress-strain curves for annealed and aluminum strips produced by CRB Process

شکل 5 منحنی تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌ی آنیل شده و ورق آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

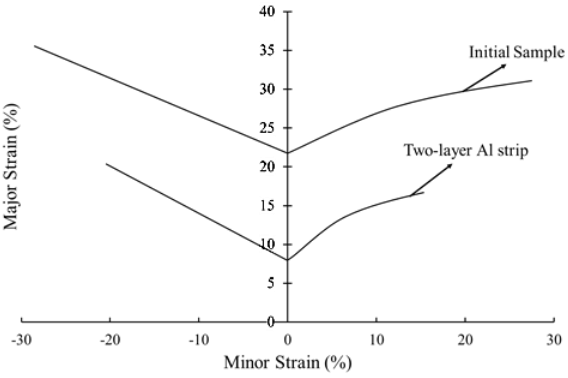


Fig. 6 FLDs of initial sample and Al strip produced by CRB

شکل 6 نمودارهای حد شکل‌پذیری برای نمونه‌ی اولیه و ورق آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

می‌باشد که در این تحقیق برای اولین بار به این مسئله به‌صورت تجربی پرداخته شده است.

با توجه به "شکل 7" میکروسختی برای ورق دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی نسبت به نمونه اولیه و با نرخ زیاد افزایش می‌یابد و مقدار میکروسختی از 25 ویکرز برای نمونه آنیل به 45 ویکرز برای نمونه دولایه آلومینیومی می‌رسد که این تغییرات باعث افزایش 80٪ در میزان میکروسختی ویکرز پس از اعمال پیوند نوردی در دمای محیط و به‌دلیل اعمال کرنش سختی و کار سرد می‌باشد [11]. همچنین در این شکل تغییرات ازدیاد طول، استحکام نهایی، استحکام تسلیم و پایین‌ترین نقطه‌ی نمودارهای حد شکل‌پذیری را برای دو نمونه‌ی اولیه و ورق دولایه آلومینیومی تولید شده با استفاده از روش پیوند سرد نوردی نشان می‌دهد. دلیل اصلی این تغییرات، کار سرد، افزایش چگالی نابه‌جایی و کرنش سختی می‌باشد [13,12]. همچنین روند تغییرات ازدیاد طول و نمودارهای حد شکل‌پذیری برای هر دو نمونه‌ی اولیه و دولایه یکسان می‌باشد. البته مقدار کاهش در ازدیاد طول ناشی از آزمون کشش به مراتب بیشتر از شکل‌پذیری می‌باشد و نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره در مقایسه با نمودارهای حد شکل‌پذیری، شکل‌پذیری در ورق‌های دولایه تولید شده با روش پیوند سرد نوردی را محدودتر می‌کند.

4- نتایج

در این تحقیق برای اولین بار شکل‌پذیری ورق‌های دولایه آلومینیومی تولید

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.55.9]

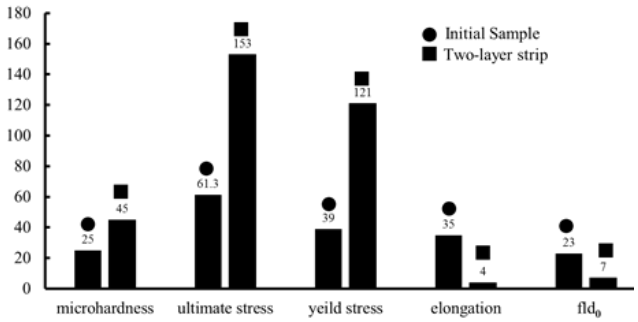


Fig.7 Changes in microhardness, strength, elongation and fld0 for initial sample and Two-layer strip produced by CRB process

شکل 7 تغییرات در میکروسختی، استحکام، ازدیاد طول و پایین‌ترین نقطه‌ی حد شکل‌پذیری برای نمونه‌ی اولیه و ورق آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون تجربی ناکازیما به عنوان کامل‌ترین و کاربردین‌ترین آزمون شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر شکل‌پذیری، خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست، ورق‌های دولایه مورد بررسی قرار گرفت و با نمونه اولیه مقایسه شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

1. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که برای نمونه آنیل شده و دولایه آلومینیومی، شکست از نوع نرم همراه با میکروحفرات و مناطق برشی خارجی است. همچنین اندازه میکروحفرات ایجاد شده در ورق دولایه تولید شده کوچکتر از دیمپل‌های ماده اولیه بوده و به اندازه آن عمیق نمی‌باشد.
2. استحکام کششی ورق دولایه آلومینیومی تولید شده نسبت به نمونه اولیه شدیداً افزایش می‌یابد و استحکام از 61مگاپاسکال برای نمونه‌ی آنیل شده به 153 مگاپاسگال برای ورق دولایه آلومینیومی می‌رسد، اما مقدار ازدیاد طول ورق دولایه نسبت به نمونه اولیه کاهش می‌یابد. همچنین میکروسختی ورق دولایه به روش پیوند سرد نوردی نسبت به نمونه اولیه افزایش می‌یابد و مقدار میکروسختی از 25 ویکرز برای نمونه آنیل به 45 ویکرز برای نمونه دولایه آلومینیومی می‌رسد.
3. نتایج حاصل از آزمون ناکازیما نشان داد که سطح زیر نمودارهای حد شکل‌پذیری ورق دولایه آلومینیومی نسبت به نمونه آنیل کاهش می‌یابد هرچند که درصد کاهش آن نسبت به مقدار ازدیاد طول کمتر می‌باشد و نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره شکل‌پذیری فرآیند پیوند سرد نوردی را محدودتر نشان می‌دهد.
4. دلیل اصلی افزایش استحکام، سختی و کاهش ازدیاد طول و پایین آمدن نمودار حد شکل‌پذیری، اعمال کرنش زیاد همراه با کار سرد می‌باشد.

5- مراجع

[1] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.

[2] L. Li, K. Nagai, F. Yin, Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, volume 9, issue 2, 2008.

[3] L. Vaidyarath, M. Nicholas, D. Milner, Pressure welding by rolling, *British welding Journal*, Vol. 6, pp. 13-28, 1959.

[4] Y. H. Chung, J. W. Park, K. H. Lee, Controlling the Thickness Uniformity in Equal Channel Angular Rolling (ECAR), *Materials Science Forum*, Vols. 539-543, pp. 2872-2877, 2007

[5] K. Nakazima, T. Kikuma, K. Hasuka, Study on the formability of steel sheets, *Yawata Technology*, pp. 8517-8530, 1968.

[6] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: numerical simulations and experimental verifications, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 1-10, 2016.

[7] R. Jamaati, M. Toroghinejad, Cold roll bonding bond strengths: Review, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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)

[12] R. Jamaati, S. Amirkhanlou, M. R. Toroghinejad, B. Niroumand, Effect of 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.

[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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.55.9]