



بررسی تجربی شکل پذیری ورق‌های آلومینیومی تولید شده با فرآیند پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون ناکازیم

داود رحمت آبادی¹، 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
* 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 شکل پذیری
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. در این تحقیق، برای اولین بار شکل‌پذیری ورق‌های دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سردی با استفاده از آزمایش ناکازیم مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ساخت ورق دولایه آلومینیومی، از یک ماشین نورد و اعمال کاهش ضخامت 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 به ترتیب 149.5 و 80% افزایش داشت. اما ازدیاد طول و شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌های اولیه به دلیل کار سرد و کرنش سختی کاهش یافت. همچنین نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشان داد که بعد از فرآیند نورد سرد پیوندی در نمونه‌ی دولایه آلومینیومی، شکست نرم همراه با میکروخفرت و مناطق برشی مشاهده می‌شود.

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

Davood Rahmatatabadi, 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 آلایزهای لایه‌ای بیش از گذشته در کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید آلایزهای چندلایه، روش نورد سرد پیوندی در سال‌های اخیر به دلیل 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، علاوه بر این فلزاتی که به وسیله 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 گلوپی موضعی را مشخص می‌کند [4]. ناکازیم و

Please cite this article using:

D. Rahmatatabadi, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 با وجود 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 ناکازیمما 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 ناکازیمما 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، مثلاً وقتی از یک ورق تک‌لایه 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 ناکازیمما را داشته باشد. قبل از انجام عملیات نورد جمعی 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 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ انجام شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه‌ها تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین مکانیزم شکست با

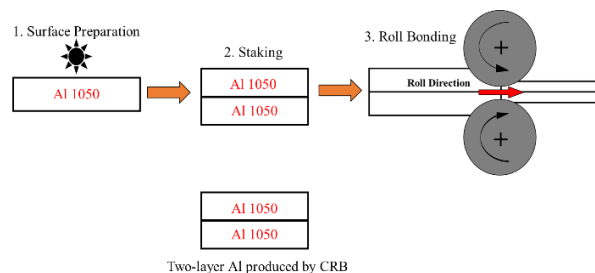


Fig.1 Schematic illustration of CRB process

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 منطبق برشی خارجی است به‌طوری که تغییر شکل بالا و گلوبی 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

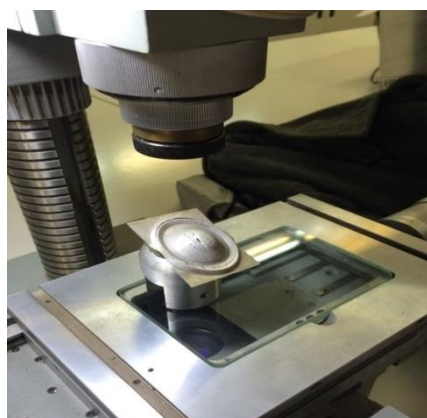


Fig.2 traveling microscopy used to reading minor and major strain

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

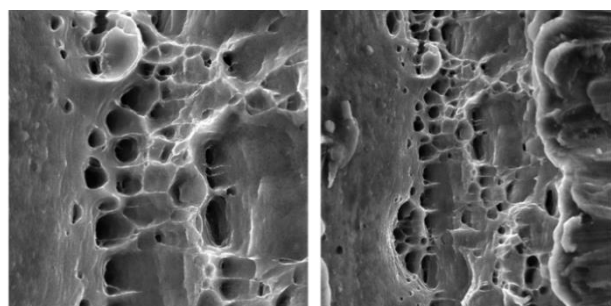


Fig.3 Tensile fracture surfaces of initial sample

شکل 3 سطح مقطع شکست نمونه اولیه

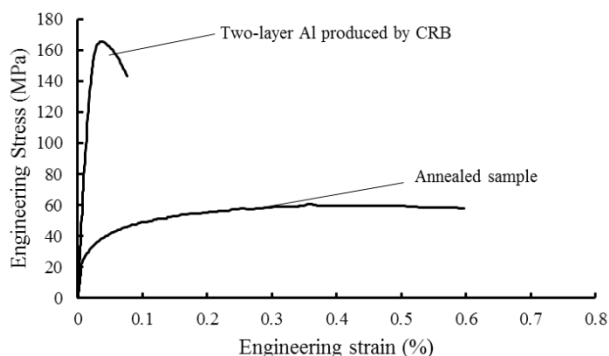


Fig. 5 engineering stress-strain curves for annealed and aluminum strips produced by CRB Process

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

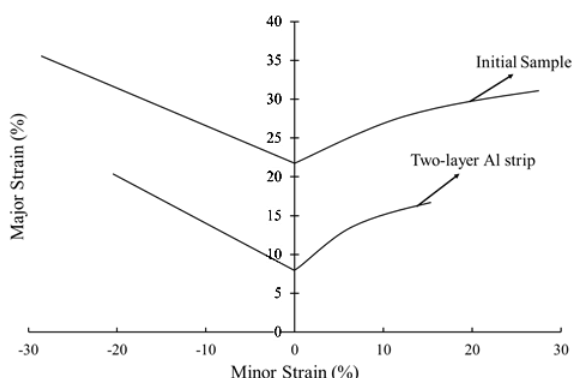


Fig. 6 FLDs of initial sample and Al strip produced by CRB

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 به صورت 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 آنبیل 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 به دلیل 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

مناطق برشی هستند. قابل توجه است که میزان تغییر شکل کم و گلوبی 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 آنبیل 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. 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 به وسیله کار سرد، کاهش ضخامت بالا (50٪)، کارسختی به وسیله نابه‌جایی توجیه کرد [8-10]. همچنین این افزایش استحکام با تأیید 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 آنبیل و دولایه آلومینیومی تولید شده، به منظور 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 آنبیل 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 تغییر شکل 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 کار سرد 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

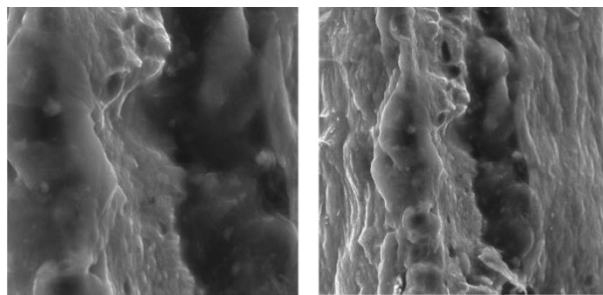


Fig. 4 Tensile fracture surfaces of Al Produced by CRB

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

شکل پذیری ورق دولایه آلومینیومی نسبت به نمونه آنیل کاهش می یابد هرچند که درصد کاهش آن نسبت به مقدار ازدیاد طول کمتر می باشد و نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوره شکل پذیری فرآیند پیوند سرد نوردی را محدودتر نشان می دهد.

4. دلیل اصلی افزایش استحکام، سختی و کاهش ازدیاد طول و پایین آمدن نمودار حد شکل پذیری، اعمال کرنش زیاد همراه با کار سرد می 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] 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, *Motares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016. (in Persian)
- [12] R. Jamaati, S. Amir Khanlou, 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.

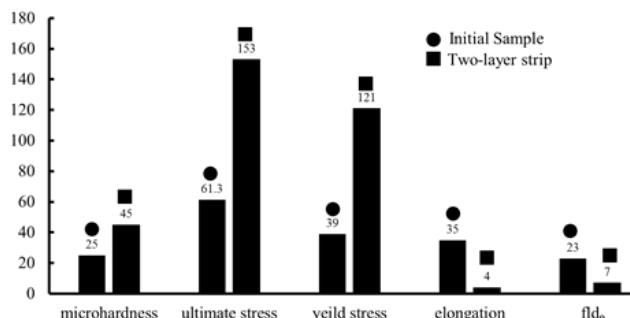


Fig.7 Changes in microhardness, strength, elongation and fld₀ for initial sample and Two-layer strip produced by CRB process

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

شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون تجربی ناکازیم به عنوان کامل ترین و کاربردی ترین آزمون شکل پذیری مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر شکل پذیری، خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست، ورق های دولایه مورد بررسی قرار گرفت و با نمونه اولیه مقایسه شد و نتایج زیر به دست آمد:

1. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که برای نمونه آنیل شده و دولایه آلومینیومی، شکست از نوع نرم همراه با میکرو حفرات و مناطق برشی خارجی است. همچنین اندازه میکرو حفرات ایجاد شده در ورق دولایه تولید شده کوچکتر از دیپل های ماده اولیه بوده و به اندازه آن عمیق نمی باشد.
2. استحکام کششی ورق دولایه آلومینیومی تولید شده نسبت به نمونه اولیه شدیداً افزایش می یابد و استحکام از 61 مگاپاسکال برای نمونه‌ی آنیل شده به 153 مگاپاسکال برای ورق دولایه آلومینیومی می رسد، اما مقدار ازدیاد طول ورق دولایه نسبت به نمونه اولیه کاهش می یابد. همچنین میکروسختی ورق دولایه به روش پیوند سرد نوردی نسبت به نمونه اولیه افزایش می یابد و مقدار میکروسختی از 25 ویکرز برای نمونه آنیل به 45 ویکرز برای نمونه دولایه آلومینیومی می رسد.
3. نتایج حاصل از آزمون ناکازیم نشان داد که سطح زیر نمودارهای حد