



بررسی تجربی شکل پذیری ورق های 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

* 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 می باشد. در این تحقیق، برای اولین بار شکل پذیری ورق های دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی 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 شکل پذیری نسبت به نمونه های اولیه به دلیل کارسرد و کرنش سختی کاهش یافت. همچنین نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشان داد که بعد از فرآیند نورد سرد پیوندی در نمونه ی دولایه آلومینیومی، شکست نرم همراه با میکرو حفرات و مناطق برشی مشاهده می شود.

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 سال های اخیر آلایزهای لایه ای بیش از گذشته در کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته اند [1]. از بین تکنولوژی های موجود برای تولید آلایزهای چندلایه، روش نورد سرد پیوندی در سال های اخیر به دلیل ویژگی های کاربردی منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش های دیگر رشد و توسعه سریعی داشته است [2]. از جمله این ویژگی ها می توان به ساده بودن این روش و همچنین قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. این فرآیند را می توان بر طیف گسترده ای از فلزات اعمال کرد، علاوه بر این فلزاتی که به وسیله جوش سنتی نمی توان به هم جوش زد را می توان با این روش بهم اتصال داد

[3,1]. در سال های اخیر از فرآیند پیوند سرد نوردی به طور گسترده برای تولید ورق ها و فویل لایه ای بزرگ استفاده می شود [1]. مطالعات بسیاری بر روی پارامترهای حاکم باند به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال انجام شده است، همچنین نورد سرد پیوندی به منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است.

در حالت کلی، شکل دهی ورق های فلزی عبارت است از انجام یک تغییر شکل پلاستیک که روی ورق انجام می پذیرد تا یک قطعه مهندسی با شکل دلخواه تولید گردد. منحنی های حد شکل دهی در حقیقت محدوده ی ترکیب کرنش هایی است که شروع گلوپی موضعی را مشخص می کند [4]. ناکازیم و

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همکاران [5] روشی برای ترسیم نمودارهای حد شکل پذیری پیشنهاد نمودند که در آن نمونه هایی مستطیلی با کمک سنبه نیم کروی شکل داده می شوند و هر دو طرف نمودار را می توان با این روش ترسیم نمود و امروزه حتی باوجود مشکلات و دشواری های آن، پرکاربردترین شیوه به دست آوردن نمودارهای حد شکل دهی در میان پژوهشگران می باشد. شاید به خاطر بروز همین مشکلات بوده است که با توجه این که روش آزمون ناکازیم که کامل ترین و پرکاربردترین روش می باشد ولی تاکنون از این روش برای بررسی شکل پذیری ورق های دولایه، استفاده چندانی نشده است. کرجی بانی و همکاران با استفاده از آزمون ناکازیم به بررسی شکل پذیری ورق دولایه آلومینیوم مس پرداختند [6].

قابل ذکر است که در مقایسه ورق های تولیدی با روش پیوند سرد نوردی و ورق تک لایه نورد شده تفاوت های وجود دارد، مثلاً وقتی از یک ورق تک لایه استفاده شود، ضخامت نهایی نمونه ی تولیدی در پایان هر سیکل نورد به میزان کاهش مورد نظر، کاهش ضخامت می یابد و نمونه ی اولیه و نورد شده به اندازه ی کاهش ضخامت مورد نظر، 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 شکل دهی با توان بالا می باشد. همچنین به دلیل محدودیت در، باید از ماده ای با استحکام پایین استفاده می شد که امکان تولید نمونه از نظر ابعاد جهت استفاده در آزمون استاندارد ناکازیم را داشته باشد. قبل از انجام عملیات نورد جمعی نمونه ها تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. عملیات آنیل به مدت یک ساعت و در دمای 380 درجه سانتی گراد و در کوره ی 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 می شوند [7] و سپس دو ورق روی هم قرار داده شد البته به منظور جلوگیری از لغزش آن ها بر روی هم، نمونه ها را از چهار طرف سوراخ کرده و توسط سیم فولادی بهم محکم بسته می شوند 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

شکل پذیری

آزمون کشش تک محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ انجام شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه ها تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد اندازه گیری شد. به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه ها و تعیین مکانیزم شکست با

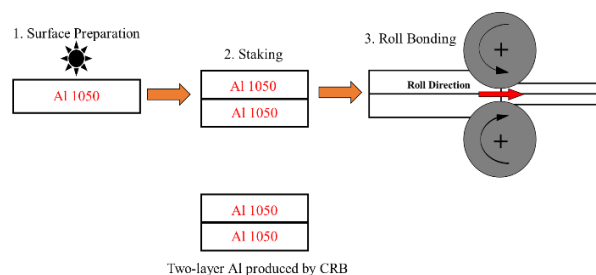


Fig.1 Schematic illustration of CRB process

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 می شود که شکست از نوع نرم همراه با میکروحفرات و منطق برشی خارجی است به طوری که تغییر شکل بالا و گلوئی شدن در حالت ماکروسکوپی قابل مشاهده است. با توجه به تصاویر "شکل 4" و بعد از فرآیند پیوند جوش نوردی دیده می شود که نمونه های شکست دارای شکست نرم همراه با میکروحفرات و

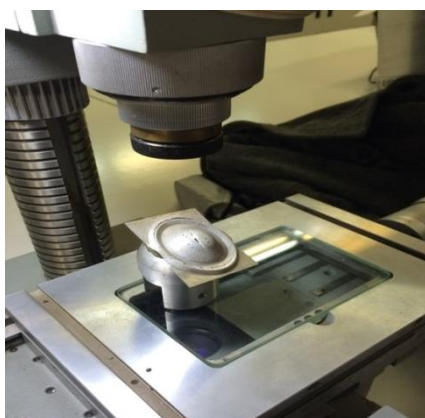


Fig.2 traveling microscopy used to reading minor and major strain

شکل 2 میکروسکوپ ورنیه دار استفاده شده جهت خواندن کرنش های اصلی و فرعی

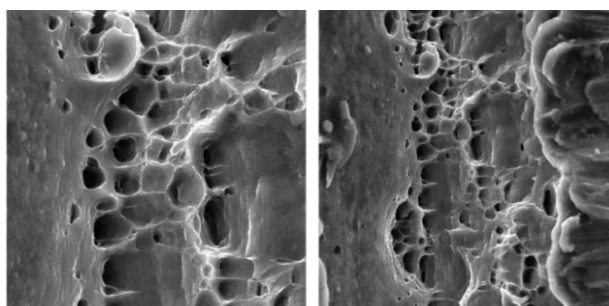


Fig.3 Tensile fracture surfaces of initial sample

شکل 3 سطح مقطع شکست نمونه اولیه

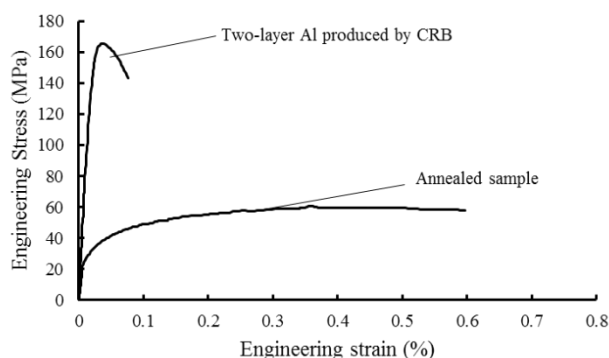


Fig. 5 engineering stress-strain curves for annealed and aluminum strips produced by CRB Process

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

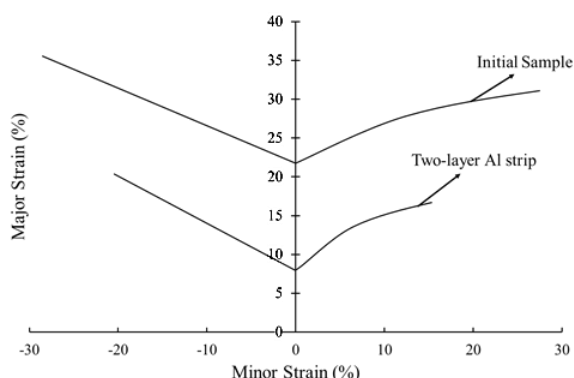


Fig. 6 FLDs of initial sample and Al strip produced by CRB

شکل 6 نمودارهای حد شکل پذیری برای نمونه‌ای 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 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 به دلیل اعمال کرنش سختی و کار سرد می‌باشد [11]. همچنین در این شکل تغییرات ازدیاد طول، استحکام نهایی، استحکام تسلیم و پایین ترین نقطه‌ی نمودارهای حد شکل پذیری 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 ناهنجاری و کرنش سختی می‌باشد [12,13]. همچنین روند تغییرات ازدیاد طول و نمودارهای حد شکل پذیری برای هر دو نمونه‌ی اولیه و دولایه یکسان می‌باشد. البته مقدار کاهش در ازدیاد طول ناشی از آزمون کشش به مراتب بیشتر از شکل پذیری می‌باشد و نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوره در مقایسه با نمودارهای حد شکل پذیری، شکل پذیری در ورق‌های دولایه تولید شده با روش پیوند سرد نوردی را محدودتر می‌کند.

4- نتایج

در این تحقیق برای اولین بار شکل پذیری ورق‌های دولایه آلومینیومی تولید

مناطق برشی هستند. قابل توجه است که میزان تغییر شکل کم و گلولی شدن بسیار کوچک رخ داده است که نتایج اعمال کرنش زیاد، کار سرد و افزایش چگالی ناهنجاری در هنگام تولید با فرآیند پیوند سرد نوردی می‌باشد. همچنین مطابق با هر دو "شکل 3 و 4" مشاهده می‌شود که اندازه میکرو حفرات ایجاد شده در پیوند جوش نوردی کوچکتر از میکرو حفرات 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 شکل پذیری

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 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. همان طور که اشاره شد، این افزایش شدید را می‌توان به وسیله کار سرد، کاهش ضخامت بالا (50٪)، کار سختی به وسیله ناهنجاری 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 شکل پذیری برای هر دو نمونه آنیل و دولایه آلومینیومی تولید شده، به منظور مقایسه شکل پذیری در یک شکل آورده شده است و همان طور که مشخص است، سطح زیر نمودار حد شکل پذیری مانند نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوره 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 شکل پذیری برای نمونه‌های دولایه تولید شده به روش پیوند سرد پیوندی می‌باشد که می‌توان عامل اصلی این کاهش شکل پذیری 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 پایین ترین نقطه در نمودار حد شکل پذیری می‌باشد. کاهش شکل پذیری 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، شکل پذیری را برای نمونه‌های تولیدی یا روش پیوند سرد نوردی محدودتر می‌کند. از طرف دیگر نمودارهای حد شکل پذیری، شکل پذیری تحت بارگذاری‌های مختلف را نمایش می‌دهد و به نوعی کامل ترین آزمون تجربی برای ارزیابی شکل پذیری

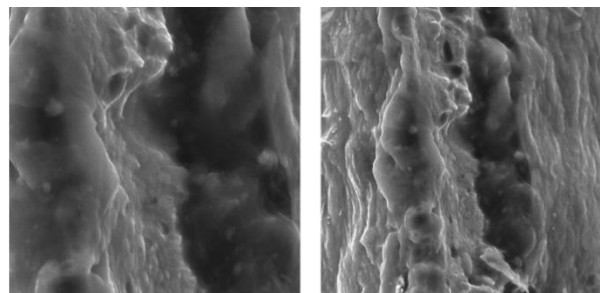


Fig.4 Tensile fracture surfaces of Al Produced by CRB

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

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, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016. (in Persian)
- [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.

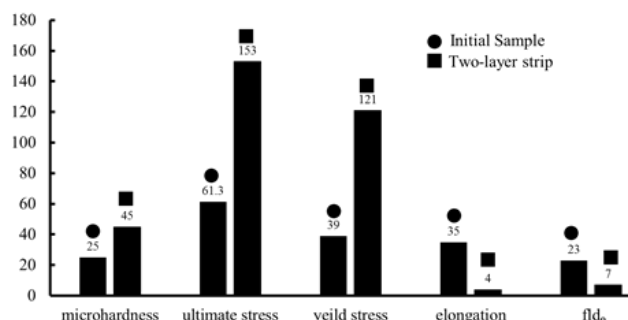


Fig.7 Changes in microhardness, strength, elongation and fld₀ for initial sample and Two-layer strip produced by CRB process

شکل 7 تغییرات در میکروسختی، استحکام، ازدیاد طول و پایین ترین نقطه ی حد شکل پذیری برای نمونه ی 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 دیمپل 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 نمونه ی 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