



# Effect of Brushing Direction and Annealing on the Microstructure and Bonding Strength of AA6061 Aluminum Alloy Processed by Accumulative Roll-Bonding

Bahman Mirzakhani <sup>1\*</sup>, Alireza Khojasteh Abbasi <sup>2</sup>, Saeed Shabestari <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Arak University, Arak, Markazi, Iran

<sup>2</sup> M. Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Tehran, Iran

\*Corresponding Author's Email: [b-mirzakhani@araku.ac.ir](mailto:b-mirzakhani@araku.ac.ir) (B. Mirzakhani)

## Paper History:

Received: 2022-08-04

Revised in revised form: 2022-06-15

Scientific Accepted: 2022-06-20

## Keywords:

Accumulative Roll-Bonding,  
AA6061 Alloy,  
Brushing,  
Peeling Test,  
Fractography

**Abstract** Accumulative Roll-Bonding (ARB) process is a Severe Plastic Deformation (SPD) process run to produce Ultra-Fine Grained (UFG) sheets using intense plastic strains via rolling machine. In this research, the effect of surface condition (brushing) and annealing treatment on the fracture surface and bonding strength of the ARBed AA6061 sheets was investigated. In this regard, the specimen surfaces were first brushed in three different directions, i.e., Rolling Direction (RD), Transverse Direction (TD), and both RD and TD. The ARB process was conducted up to five cycles, and specimens were tested after the first, third, and fifth cycles. The annealing treatment was conducted for two hours at 415 °C after the first, third, and fifth cycles. The bonding strength and hardness profile in the cross-section (perpendicular to the rolling direction) were measured through peeling and hardness tests, respectively. The results show that RD is the most effective direction for brushing to achieve high bonding strength with the mean strength of 0.60 N/mm. The fracture surfaces of the specimen were observed using a Scanning Electron Microscope (SEM). The results represent the broad areas of mechanical bonding in the rolling direction. Further, post-annealing treatments are shown to increase the bonding strength.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.312572.1195>

URL: [https://www.jamt.ir/article\\_152144.html](https://www.jamt.ir/article_152144.html)

## 1. INTRODUCTION

The 6XXX series of aluminum alloys are widely used in both automotive and aerospace industries due to their high strength and good corrosion resistance [1]. Grain boundary strengthening is considered the main mechanism in Severe Plastic Deformation (SPD) methods such as Accumulative Roll-Bonding (ARB). Introduced by Saito et al., this process can be easily used for manufacturing the AA6XXX sheets [2-4]. There are many ARB parameters that affect the strength of the sheet bonds [4-12] among which, the surface quality and sheet formability are the significant ones. According to the studies, annealing before rolling enhances the bonding strength and also improves the overall strength due to the diffusion bonding in some cases [13, 14]. Sheet surface must be cleaned and burnished in order to obtain strong bonding [15]. To date, a majority of research studies have focused on the ARB pass number and different materials found in the bond layers [6-14]. Rezaei et al. [16] investigated the impact of texture and annealing treatment on the ARBed AA6061 sheets. Zhang et al. [17] examined the tensile properties of three-layer composite of AA6061-Ti-AA6061 via rolling at 400, 450, and 500 °C. The two layers of 1XXX and 7XXX series of aluminum alloys through transverse ARB were manufactured by Magalhaes et al. [7]. A few studies also evaluated the impact of burnishing conditions on the bond strength. Jamaati and

Toroghinejad [18] investigated the effect of the size of burnishing wire on the quality of the AA1100 ARB bonds. The current study aims to evaluate the effects of the burnishing direction of sheets before ARB and their temper conditions, e.g., work hardened or fully annealed of sheets on the strength and microstructure of bonding.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In this study, the AA6061 sheets of  $1 \times 45 \times 200 \text{ mm}^3$  were prepared for ARB. They were first cleaned by acetone for five minutes and then, the internal surfaces of the sheets were burnished by 0.5 mm steel wire in three directions, i.e., RD, TD, and RD-TD. The ARB was performed by 200 mm rolls and 20 ton rolling machine. The effect of different temper conditions of the materials was also studied by annealing one or both sheets at 415 °C for 120 min. All the ARBed samples were then tested by Universal Testing Machine to measure the bonding strength based on the ASTM D1876-08 standard [19]. The quality of the sheet surface and interface were also investigated by Tescan SEM as well.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. The influence of burnishing direction

The results of peel testing are shown in Table 1 according to which, the bonding strength of the RD

Please cite this article as: Mirzakhani, B., Khojasteh Abbasi, A. R., Shabestari, S., "Effect of brushing direction and annealing on the microstructure and bonding strength of AA6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 12, No. 1, (2023), 43-56. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.312572.1195>).

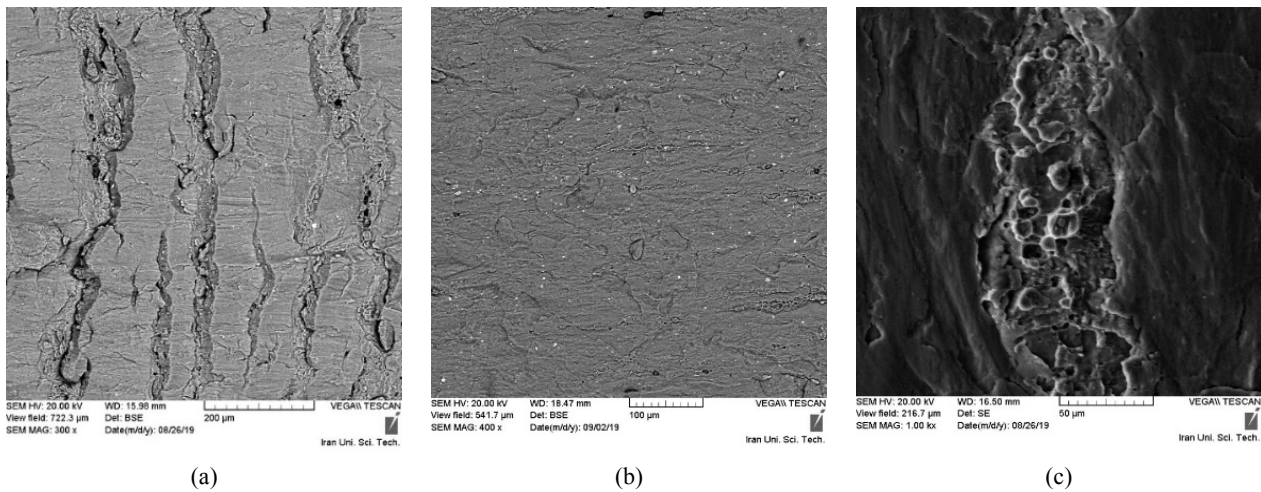


burnished ARB sheets is almost twice that of the TD and RD-TD ones, as shown in the SEM micrograph depicted in Figure 1. The cracks detected in the the fracture surface of the ARB sheets burnished in the RD are more

and larger than those in the other two other directions of TD and RD-TD. Therefore, the extruded material into these notches is more possible in the case of RD burnished sample.

**Table 1.** The results of peel test of three burnishing direction of ARB sheets

Burnishing direction	Mean force (N)	Mean strength (MPa)
RD	15.4	0.6
TD	9.1	0.35
RD-TD	8.8	0.34

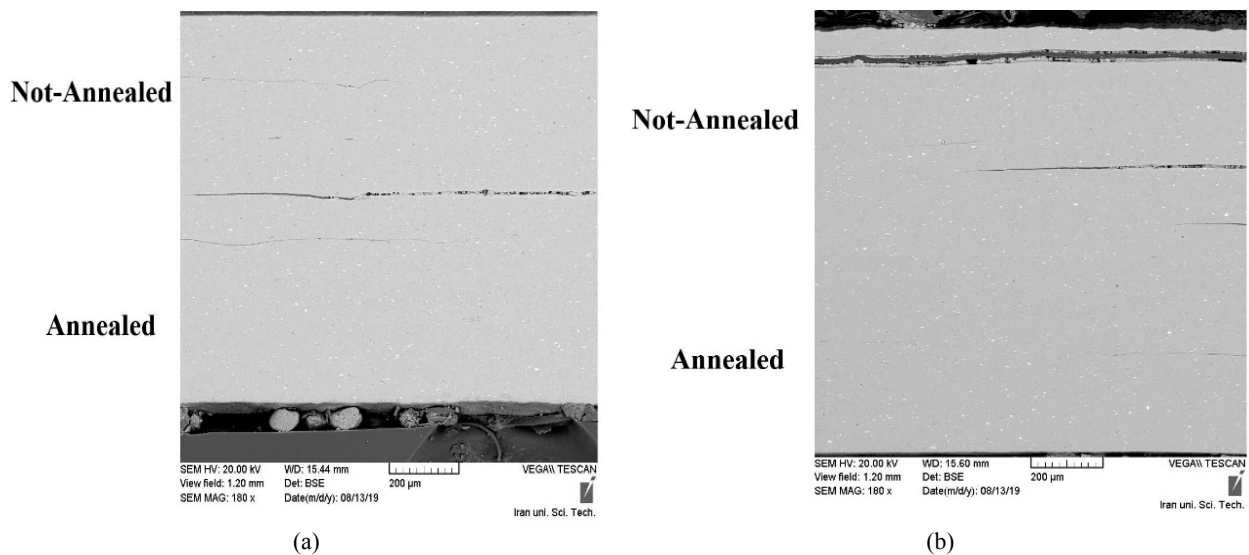


**Figure 1.** SEM micrograph of fracture surface after peeling test of a) RD, b) TD and c) RD-TD burnished samples

**3.2. The influence of annealing**

In order to determine the effect of the material temper on the bonding resistance, half of the sample is annealed after ARB in Cycles 2 and 4 and then rolled. The SEM

images of the bond interface are illustrated in Figure 2 that shows the improvement in the ductility of the material due to annealing, thus leading to strong interface and less discontinuity in ARB Cycle 5 than that in Cycle 3.



**Figure 2.** SEM micrograph of sheet interface after; a) 3 and b) 5 ARB cycles

**4. CONCLUSION**

1. The peeling resistance values of the ARB sheet burnished in the RD, TD, and RD-TD directions were obtained as 0.6, 0.35, and 0.6 MPa, respectively.
2. Burnishing in the RD intensified the surface hardness and created a transvers crack which in turn improved the interface bonding.

3. Annealing half of the ARB sheets after Cycles 2 and 4 ARB led to the extrusion of material into cracks much easier, hence strong bonding.

**5. ACKNOWLEDGEMENT**

The authors are grateful to the metallography lab technician for the sample preparation.

## REFERENCES

- Murtha, S. J., "New 6XXX aluminum alloy for automotive body sheet applications", *SAE Transactions*, Vol. 104, Section 5: JOURNAL OF MATERIALS & MANUFACTURING, (1995), 657-666. <http://www.jstor.org/stable/44473273>
- Kaibyshev, R., Mazurina, I., "Mechanisms of grain refinement in aluminum alloys during severe plastic deformation", *Materials Science Forum*, Vol. 467, (2004), 1251-1260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.467-470.1251>
- Valiev, R. Z., "1- Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation (SPD)", *Nanostructured Metals and Alloys, Processing, Microstructure, Mechanical Properties and Applications, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, (2011), 3-39. <https://doi.org/10.1533/9780857091123.1.3>
- Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N., Sakai, T., "Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding (ARB) process", *Acta Materialia*, Vol. 47, No. 2, (1999), 579-583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6)
- Ghalehbandi, S. M., Malaki, M., Gupta, M., "Accumulative roll bonding—A review", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 17, (2019), 3627. <https://doi.org/10.3390/app9173627>
- Arigela, V. G., Palukuri, N. R., Singh, D., Kolli, S. K., Jayaganthan, R., Chekhonin, P., Scharnweber, J., Skrotzki, W., "Evolution of microstructure and mechanical properties in 2014 and 6063 similar and dissimilar aluminium alloy laminates produced by accumulative roll bonding", *Journal of Alloys & Compounds*, Vol. 790, (2019), 917-927. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.231>
- Magalhães, D. C. C., Sordi, V. L., Kliuga, A. M., "Microstructure evolution of multilayered composite sheets of AA1050/AA7050 Al alloys produced by asymmetric accumulative roll-bonding", *Materials Characterization*, Vol. 162, (2020), 110226. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110226>
- Mansouri, H., Eghbali, B., Afrand, M., "Producing multi-layer composite of stainless steel/aluminum/copper by accumulative roll bonding (ARB) process", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 46, (2019), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.025>
- Avazzadeh, M., Alizadeh, M., Tayyebi, M., "Investigation of microstructure and tensile properties of CuZnAl shape memory alloy produced by accumulative roll bonding and subsequent heat treatment", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 9, (2020), 2185-2195. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-41388-en.html>
- Jalali, M., Farmanesh, F., Soltanipour, A., "Investigation of severe plastic deformation effect on microstructure of Ti-6Al-4V alloy", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 5, No. 1, (2016), 59-64. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2637.70325>
- Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., "Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, (2010), 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
- McBride, B. N. L., Clarke, K. D., Clarke, A. J., "Mitigation of edge cracking during accumulative roll bonding (ARB) of aluminum strips", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 55, (2020), 236-239. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.042>
- Yan, J., Lai, Q., Wang, J., Shen, Y., "Saturation controlled softening/hardening in pure aluminum processed by surface rotation rolling", *Scripta Materialia*, Vol. 182, (2020), 104-108. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.03.003>
- Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., "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, (2010), 4508-4513. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.022>
- Li, L., Nagai, K., Yin, F., "Progress in cold roll bonding of metals", *Science and Technology Advanced Materials*, Vol. 9, No. 2, (2008), 023001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-6996/9/2/023001/meta>
- Rezaei, M., Toroghinejad, M., Ashrafzadeh, F., Asgari, H., Szpunar, J., "Textural evolution of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding process", *Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 8, No. 3, (2021), 18-25. [https://ijmf.shirazu.ac.ir/article\\_6265\\_5e8638f243f573ef44739ff2d60d4b70.pdf](https://ijmf.shirazu.ac.ir/article_6265_5e8638f243f573ef44739ff2d60d4b70.pdf)
- Zhang, X., Yu, Y., Liu, B., Zhao, Y., Ren, J., Yan, Y., Cao, R., Chen, J., "Microstructure characteristics and tensile properties of multilayer Al-6061/Ti-TA1 sheets fabricated by accumulative roll bonding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 275, (2020), 116378. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116378>
- Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., "The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 2, (2011), 191-197. <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9664-7>
- ASTM, Standard test method for peel resistance of adhesive bonds between flexible adherends by using a T-peel test, (2015). <https://www.astm.org/d1876-08r15e01.html>



## مقاله کامل پژوهشی

## تأثیر جهت برس کاری و عملیات بازپخت بر ریزساختار و استحکام حاصل از فرایند اتصال

## نورد تجمعی آلیاژ آلومینیم AA6061

بهمن میرزاخانی<sup>۱\*</sup>، علیرضا خجسته عباسی<sup>۲</sup>، سعید شبستری<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، مرکزی، ایران<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، ایران<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، ایران

## تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

پذیرش علمی: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

## کلیدواژه‌ها:

اتصال نورد تجمعی،

آلیاژ AA6061،

برس کاری،

آزمایش لایه‌کنی،

شکست‌نگاری

**چکیده** فرایند اتصال نورد تجمعی (ARB) یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که با اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید سعی در ریزدانه‌کردن مواد و تولید مواد نانوساختار در حد چند ۱۰ نانومتر یا ساختار فوق‌ریزدانه حدود ۱۰۰ نانومتر دارد. در این پژوهش، تأثیر جهت برس کاری سطح پیش از نورد و همچنین انجام عملیات حرارتی بازپخت بر استحکام اتصال حاصل از فرایند اتصال نورد تجمعی و سطح شکست آلیاژ آلومینیم AA6061 بررسی شد. بدین منظور، برس کاری سطح ورق‌ها در جهت نورد (RD)، جهت عرضی نورد (TD) و ترکیب آن‌ها (RD-TD) انجام شد. همچنین، فرایند اتصال نورد تجمعی تا ۵ سیکل انجام شد. عملیات بازپخت پس از سیکل اول و در دمای ۴۱۵ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت انجام شد. استحکام اتصال با استفاده از آزمایش لایه‌کنی بررسی شد. پروفیل سختی در مقطع ضخامت نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که برس کاری سطح و در جهت نورد (RD) با استحکام متوسط ۰/۶۰ نیوتن بر میلی‌متر (N/mm) در مقایسه با دو جهت دیگر بهترین اتصال را دارد. بررسی سطوح شکست با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM) حاکی از وجود مناطق اتصال مکانیکی بیشتر و وسیع‌تر در این نمونه است. همچنین، انجام عملیات بازپخت پس از هر سیکل اتصال نورد تجمعی باعث بهبود استحکام اتصال می‌شود.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.312572.1195> URL: [https://www.jamt.ir/article\\_152144.html](https://www.jamt.ir/article_152144.html)

## ۱- مقدمه

هال - پیچ، افزایش می‌یابد، پژوهش‌های بسیاری برای تولید آلیاژهای فلزی ریزدانه و فوق‌ریزدانه<sup>۱</sup> از طریق فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۲</sup> انجام شده است. این روش‌ها اساساً مبتنی بر اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید بر قطعه، بدون ایجاد تغییرات ابعادی، طی چندین سیکل پیایی هستند. در نتیجه اعمال چنین کرنش‌های شدیدی می‌توانیم به ساختار فوق‌ریزدانه دست یابیم [۲ و ۳]. یکی از مهم‌ترین فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، که به خوبی می‌تواند در تولید ورق‌های آلیاژ آلومینیم

آلیاژهای آلومینیم گروه ۶۰۰۰ به دلیل استحکام خوب و مقاومت مناسب به خوردگی در صنایع خودروسازی و هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارند. محصولات تولیدی از خانواده این آلیاژها معمولاً به صورت ورق و پروفیل با استفاده از عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی استحکام‌دهی می‌شوند که مستلزم صرف انرژی و زمان و غیره است [۱]. از آنجایی که استحکام مواد با کاهش اندازه دانه و ایجاد ساختار ریزدانه، طبق رابطه

<sup>۱</sup> Ultra-Fine Grained

<sup>۲</sup> Severe Plastic Deformation

\*عهده دار مکاتبات: بهمن میرزاخانی

آزمایش لایه‌کنی می‌شود. همچنین، نفوذ اتمی در فصل مشترک و تحرکات اتمی کوتاه‌برد، که به وسیله حرارت فعال می‌شوند، به‌عنوان یکی از دلایل افزایش استحکام اتصال مطرح شده است. حذف یا کاهش تنش‌های باقی مانده در مواد اتصال یافته در حالت جامد از دیگر تأثیرات عملیات بازپخت پس از نورد است. عملیات بازپخت پس از نورد باعث بهبود و تکمیل اکستروژن فلز تمیز می‌شود و استحکام اتصال را افزایش می‌دهد. از طرفی، افزایش دمای بازپخت در برخی فلزات و آلیاژها باعث تشکیل فازهای شکننده‌ای مثل ترکیبات بین‌فلزی می‌شود. بنابراین، به‌منظور دستیابی به انعطاف‌پذیری و اتصال مناسب، دما و زمان فرایند بازپخت باید بهینه باشند. بنا بر پژوهش‌های انجام شده، کاهش سختی و افزایش شکل‌پذیری اهمیت بسیاری در ایجاد اتصال دارد. در نتیجه، اثر بازپخت پیش از نورد محسوس‌تر از بازپخت پس از نورد است [۱۴].

از دیگر پارامترها می‌توان به شرایط سطحی تسمه‌ها پیش از فرایند اتصال نورد تجمعی اشاره کرد. سطح فلزات معمولاً با آلودگی‌هایی نظیر چربی، رطوبت، گردو خاک، فیلم‌های اکسیدی و غیره پوشیده شده است. برای برقراری اتصال مناسب بین دو ورق لازم است سطح نمونه، پیش از فرایند نورد، از هرگونه آلودگی پاک شود و سطوح فلز دو ورق در تماس مستقیم با هم قرار گیرند. از این رو، مجموعه‌ای از عملیات آماده‌سازی سطحی شامل چربی‌زدایی و برس‌کاری پیش از نورد الزامی است. همچنین، پس از انجام برس‌کاری، باید فرایند نورد در کمترین زمان ممکن انجام شود تا از تشکیل مجدد اکسید روی سطح جلوگیری شود [۱۵]. رضایی<sup>۳</sup> و همکاران [۱۶] درخصوص بافت بلوری آلیاژ AA6061 پس از انجام عملیات اتصال نورد تجمعی مطالعه کردند و تأثیر عملیات حرارتی آنیل، میزان عنصر محلول منیزیم و رسوبات غیربرشی در ساختار بر بافت پس از فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید را بررسی کردند.

بیشتر پژوهش‌ها در زمینه اتصال نورد تجمعی به بررسی تأثیر تعداد پاس‌های نورد و ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای از دو ورق غیرهم‌جنس انجام شده‌اند [۱۴-۱۶]. ژانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۱۷] کامپوزیت سه‌لایه آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-تیتانیوم-آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ را به‌کمک فرایند اتصال نورد تجمعی در دماهای ۴۰۰،

از جمله گروه ۶۰۰۰ استفاده شود، فرایند اتصال نورد تجمعی<sup>۱</sup> پیوندی است. فرایند اتصال نورد تجمعی، برخلاف دیگر روش‌های تغییر پلاستیک شدید، به تجهیزات مخصوص و قالب‌های گران‌قیمت نیاز ندارد و از دستگاه نورد برای تغییر شکل و اعمال کرنش استفاده می‌کند. این فرایند را در سال ۱۹۹۸ سایتو<sup>۲</sup> و همکاران معرفی کردند [۴].

در سال‌های اخیر، درباره فرایند اتصال نورد تجمعی به شکل‌های گوناگون و روی آلیاژهای متنوع از یک جنس یا جنس‌های متفاوت تحقیق و بررسی شده است [۱۰-۱۶]. پارامترهای بسیاری بر کیفیت و استحکام اتصال برقرار شده در فرایند اتصال نورد تجمعی تأثیرگذار هستند [۴ و ۱۱ و ۱۲]. کیفیت سطحی و میزان شکل‌پذیری ورق‌ها، در طی نورد، دو عامل تأثیرگذار در این پارامترها هستند. تحقیقات انجام شده نشان داده‌اند که انجام عملیات بازپخت پیش از نورد باعث افزایش استحکام اتصال حاصل خواهد شد. بازپخت کردن ورق‌ها پیش از نورد باعث تسهیل ایجاد ترک و شکست خوردن لایه‌های سطحی و شکل‌پذیری و اکستروژن فلز تمیز در لایه‌های میانی می‌شود. همچنین، عملیات بازپخت موجب کاهش سختی ورق‌ها و افزایش چقرمگی اتصال خواهد شد. در حین انجام آزمایش لایه‌کنی، ترک در محل اتصال دو ورق تشکیل می‌شود. افزایش چقرمگی اتصال باعث افزایش نیروی موردنیاز برای تشکیل و رشد ترک می‌شود و استحکام اتصال را بهبود می‌بخشد. همچنین، فرایند بازپخت موجب کاهش تنش برای تغییر شکل لازم در ایجاد اتصال می‌شود. به‌منظور ایجاد اتصال مناسب بین دو ورق، باید بر انرژی فعال‌سازی تشکیل اتصال غلبه کرد. فرایند بازپخت پیش از نورد قسمت زیادی از این انرژی را تأمین و نقش تغییر شکل را کم‌رنگ می‌کند. به عبارت دیگر، فرایند بازپخت امکان دستیابی به اتصال مناسب را با کاهش ضخامت‌های کمتری فراهم می‌کند [۱۳].

پژوهش‌ها گزارش کرده‌اند که عملیات بازپخت پس از نورد باعث بهبود استحکام اتصال، حتی در زمان و دمای کم، خواهد شد. بازپخت پس از نورد با کاهش سختی ورق‌ها باعث افزایش چقرمگی اتصال می‌شود و، همانند بازپخت پیش از نورد، باعث افزایش نیروی لازم برای تشکیل و رشد ترک در حین

<sup>3</sup> Rezaei<sup>4</sup> Zhang<sup>1</sup> Accumulative Roll Bonding (ARB)<sup>2</sup> Saito

بررسی شده است. همچنین، تأثیر حالت کارسختی یا بازپخت یکی از دو ورق و ایجاد اختلاف سختی بین دو نیمه بر خواص و ساختار نمونه‌های اتصال نورد تجمعی شده بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، اثر برس‌کاری سطح ورق فرایند اتصال نورد تجمعی و تأثیر حالت ورق بر استحکام اتصال، بررسی شده است. آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ طبق ترکیب شیمیایی جدول ۱ استفاده شد. ورق‌هایی از این آلیاژ با ضخامت یک میلی‌متر برای انجام فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید تهیه شدند. یکی از مراحل اولیه و مهم فرایند اتصال نورد تجمعی آماده‌سازی نمونه‌ها است. این مرحله برای اتصال بیشتر و بهتر دو ورق در حین فرایند است. ابتدا تسمه‌ها در دو ابعاد  $1 \text{ mm}^3 \times 45 \times 200$  و  $1 \text{ mm}^3 \times 25 \times 100$  برای انجام فرایند اتصال نورد تجمعی با دستگاه گیوتین بریده شدند. سپس، در گوشه‌های نمونه، با استفاده از دریل، چهار سوراخ برای بستن ورق‌ها با مفتول‌های آلومینیمی ایجاد شد. تسمه‌ها با طول و عرض بزرگ‌تر برای انجام آزمایش لایه‌کنی تهیه شدند.

۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تولید کردند و خواص کششی و ریزساختار آن‌ها را آزمایش کردند. کامپوزیت لایه‌ای از دو نوع آلیاژ آلومینیم گروه ۱۰۰۰ و ۷۰۰۰ با فرایند اتصال نورد تجمعی غیرمتقارن را مگلهیز<sup>۱</sup> و همکاران [۷] تولید و ریزساختار آن را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اتصال نورد تجمعی در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس با انحلال جزئی رسوبات و رسوب فازهای  $\eta$  و  $\eta'$  اثر سخت‌شوندگی بیشتری به‌همراه دارد. پژوهش‌های اندکی به بررسی تأثیر برس‌کاری به‌عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در کیفیت استحکام اتصال ایجاد شده پرداخته‌اند. برای مثال، جماعتی و طرقي‌نژاد<sup>۲</sup> [۱۸] اثر طول و قطر سیم برس مورد استفاده برای برس‌کاری را بر سختی سطح نمونه آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ بررسی کرده‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، سختی سطح برس‌کاری شده با افزایش قطر سیم و کاهش طول سیم افزایش می‌یابد. اما در این نتایج به تأثیر جهت برس‌کاری ورق‌ها اشاره‌ای نشده است.

در پژوهش حاضر، اثر جهت برس‌کاری نمونه‌ها پیش از فرایند اتصال نورد تجمعی بررسی شده است. نمونه‌ها در جهات موازی با جهت نورد<sup>۳</sup> (RD) و جهت عرضی نورد<sup>۴</sup> (TD) و همچنین تلفیق این دو جهت (RD-TD) برس‌کاری شده‌اند و اثر جهات گوناگون برس‌کاری بر استحکام اتصال به‌دست آمده

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ AA6061

Si	Mg	Fe	Cu	Cr	Ni	Ti	Zn	Mn	Al
۰/۶۳۷	۰/۹۹	۰/۱۶۲	۰/۱۹۸	۰/۲۶۵	۰/۰۰۴	۰/۰۹۲	۰/۰۷۱	۰/۰۸۷	بقیه

این عملیات، ضمن اکسیدزدایی از سطح فلز، شیارهایی روی سطح ایجاد می‌کند که باعث افزایش سختی سطح نمونه می‌شود. شیارهای ایجاد شده محل‌های مناسبی را برای سیلان فلز در حین فرایند نورد ایجاد می‌کنند. در این مقاله، برای بررسی تأثیر جهت شیارهای ایجاد شده توسط برس‌کاری بر استحکام اتصال، تسمه‌ها در جهت‌های موازی با جهت نورد (RD) و جهت عرضی نورد (TD) و همچنین تلفیق این دو جهت (RD-TD) برس‌کاری شدند و با نمونه‌ای که برس‌کاری نشده بود، پس از عملیات اتصال نورد تجمعی، از نظر کیفیت اتصال مقایسه شدند.

وجود هرگونه چربی یا اکسید روی ورق‌ها به ایجاد نشدن اتصال مناسب و یکنواخت بین دو تسمه و در نتیجه ایجاد نشدن خواص موردنظر در نمونه‌ها منجر خواهد شد. به همین دلیل، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در محلول استون آزمایشگاهی (خلوص ۹۹/۹۵ درصد) قرار گرفتند تا عمل چربی‌زدایی و شست‌وشو انجام شد. پس از آن، عملیات برس‌کاری با استفاده از برس فولادی با قطر ۰/۵ میلی‌متر روی سطح داخلی نمونه‌ها انجام شد و دو نمونه از طرف سطوح برس‌خورده روی هم قرار گرفتند و سپس عملیات برس‌کاری به مدت ۳ دقیقه انجام شد.

<sup>3</sup> Roll Direction (RD)

<sup>4</sup> Transverse Direction (TD)

<sup>1</sup> Magalhaes

<sup>2</sup> Jamaati & Toroghinejad

بازپخت شدند. سپس، این نمونه‌ها، بدون هیچ‌گونه عملیات بازپخت بین سیکل‌های اتصال نورد تجمعی، به ترتیب تا سیکل دوم و چهارم نورد شدند و نمونه سیکل دوم و چهارم تولید شدند. به منظور بررسی تأثیر عملیات بازپخت و کارسختی بر استحکام اتصال، پس از برش نمونه‌های سیکل دوم و چهارم و تبدیل آن‌ها به ۲ نیمه مساوی، یک نیمه بازپخت شد و نیمه دیگر به صورت کارسخت شده روی دیگری قرار گرفت و به ترتیب تا سیکل سوم و پنجم تحت فرایند اتصال نورد تجمعی قرار گرفتند. عملیات بازپخت در دمای ۴۱۵ درجه سلسیوس و به مدت ۱۲۰ دقیقه انجام شد.

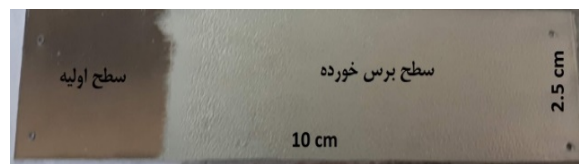
### ۲-۱- آزمایش‌های تجربی

پس از انجام عملیات اتصال نورد تجمعی، نمونه‌های سیکل اول بازپخت شدند و آزمایش لایه‌کنی روی این نمونه‌ها، که هر یک جهت برش کاری متفاوتی دارند (موازی با جهت نورد (RD)، جهت عرضی نورد (TD) و ترکیب آن‌ها (RD-TD))، با استفاده از دستگاه کشش (Universal Testing Machine) با ظرفیت یک تن (نیرو کنترل) انجام شد. در شرایط گوناگون، به دلیل محدودیت نمونه‌ها، یک نمونه تحت آزمایش لایه‌کنی واقع شد. برای انجام این آزمایش کشش، از استاندارد ASTM D1۸۷۶-۰۸ استفاده شده است [۱۹]. سرعت فک‌های کشش ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

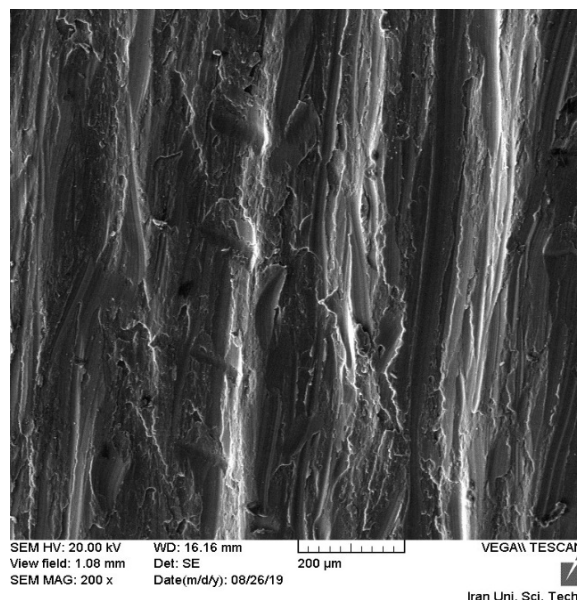
مطابق رابطه (۱)، میزان استحکام متوسط لایه‌کنی نمونه‌ها از تقسیم نیروی متوسط به دست آمده از آزمون لایه‌کنی بر پهنای پیوند، که همان پهنای تسمه‌ها و مطابق استاندارد یک اینچ است، به دست آمده است [۱۱]. برای بررسی سطوح اتصال پس از آزمایش لایه‌کنی و مقطع نمونه‌های نورد شده در شرایط گوناگون از میکروسکوپ نوری<sup>۱</sup> و الکترونی روبشی<sup>۲</sup> تسکان (Tescan) مدل وگا۲ (Vega2) استفاده شد. آزمایش میکروسختی سنجی<sup>۳</sup> ویکرز با بار اعمالی ۵۰۰ گرم نیز برای تعیین پروفیل سختی مقطع اتصال از سطح به سمت فصل مشترک انجام شد [۱۱].

$$(1) \quad \text{استحکام متوسط لایه‌کنی} = \frac{\text{نیروی متوسط}}{\text{پهنای پیوند}}$$

کلیه مراحل آماده‌سازی، به منظور جلوگیری از ایجاد هرگونه آلودگی، با استفاده از دستکش و پنس انجام شد. شکل ۱ سطح تسمه را قبل و بعد از برش کاری نشان می‌دهد. شکل ۲ اثر برش کاری بر سطح نمونه را در مقیاس میکروسکوپی به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۱. ابعاد نمونه و سطوح آن پیش و پس از برش کاری



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح برش کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD)

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، فرایند اتصال نورد تجمعی توسط دستگاه نورد با ظرفیت ۲۰ تن و غلتک‌هایی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر طی سه مرحله تا رسیدن به ضخامت یک میلی‌متر با سرعت ۴۰ دور بر دقیقه (rpm) انجام شد. پارامترهای نورد متناسب با دستگاه نورد موجود و قابلیت‌های آن و ضخامت نمونه و ضخامت نهایی مورد نظر بوده‌اند. پس از انجام سیکل اول عملیات اتصال نورد تجمعی و تولید نمونه‌های آزمایش لایه‌کنی، دو نمونه دیگر، که در جهت موازی با جهت نورد (RD) برش کاری شده بودند، پس از انجام سیکل اتصال نورد تجمعی،

<sup>3</sup> Micro-Hardness Testing

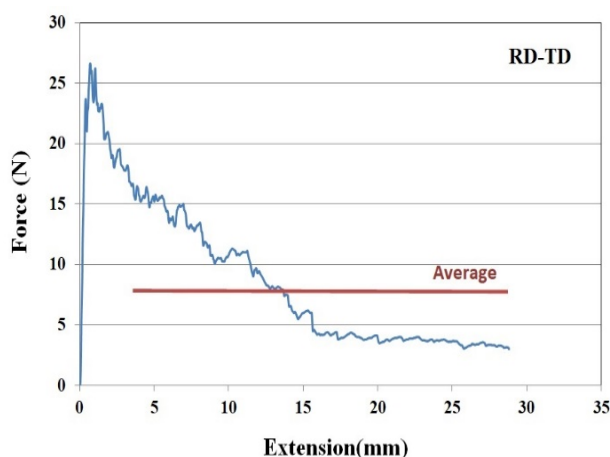
<sup>1</sup> Optical Microscope

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تأثیر جهت برس کاری

به منظور بررسی استحکام اتصال تسمه‌های نورد شده از آزمایش لایه‌کنی استفاده شد که نتایج حاصل در نمودار شکل ۳ و جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که از منحنی‌های شکل ۳ و مقادیر جدول ۲ مشاهده می‌شود، استحکام برس کاری در جهت موازی با جهت نورد (RD) نزدیک به دو برابر استحکام نمونه‌های برس کاری شده در جهت عرضی نورد (TD) و ترکیب آن‌ها (RD-TD) بوده است. با استفاده از رابطه (۱) و نیروی متوسط لایه‌کنی به دست آمده از آزمایش، استحکام متوسط لایه‌کنی محاسبه شد که مقادیر حاصل در جدول ۲ ارائه شده است. دلیل استحکام بیشتر نمونه برس کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD) در مقایسه با دو نمونه دیگر را می‌توان با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش لایه‌کنی توضیح داد.



شکل ۳. نمودار آزمایش لایه‌کنی نمونه برس کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD)، جهت عرضی نورد (TD) و ترکیب آن‌ها (RD-TD)

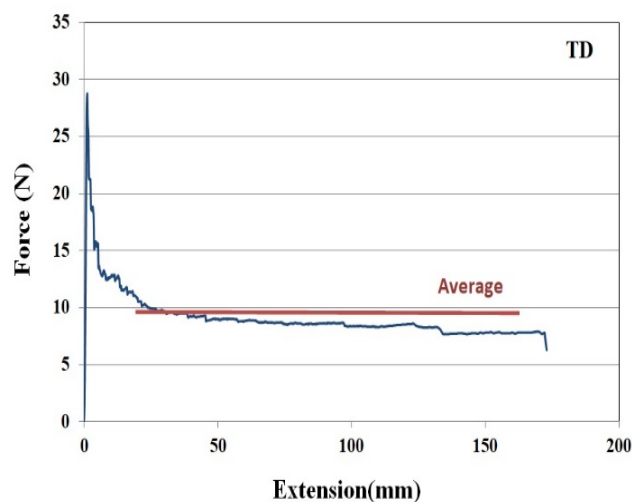
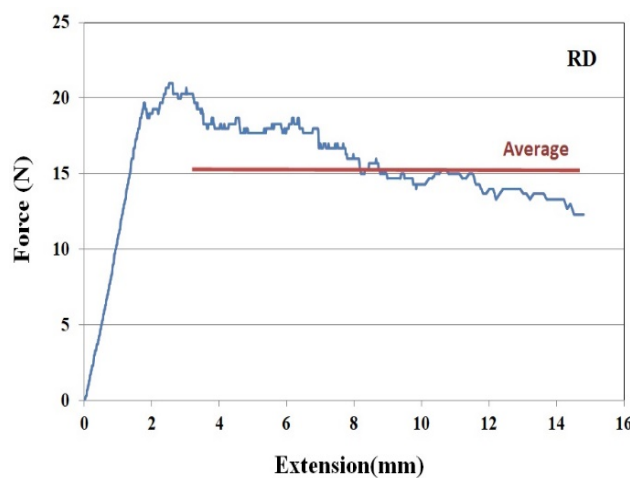
جدول ۲. پارامترهای به دست آمده از آزمایش لایه‌کنی

جهت برس کاری	نیروی متوسط (N)	استحکام متوسط (N/mm)
RD-TD	۸/۸	۰/۳۴
RD	۱۵/۴	۰/۶۰
TD	۹/۱	۰/۳۵

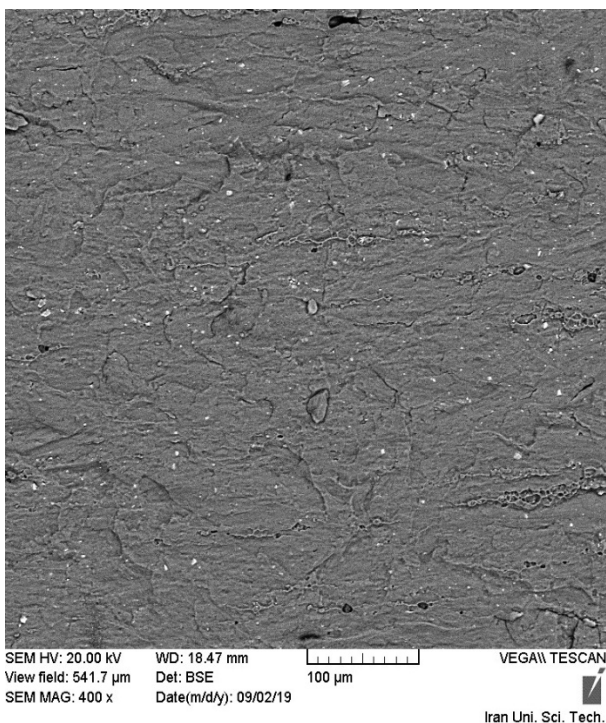
#### ۳-۲- بررسی سطح شکست فصل مشترک اتصال

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست نمونه‌ای برس کاری شده به ترتیب در جهات موازی با جهت نورد، در جهت عرضی نورد و ترکیب آن دو، پس از آزمایش لایه‌کنی آورده شده است. مطابق آنچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ترک‌های به وجود آمده در سطح شکست نمونه برس کاری شده در جهت موازی با جهت نورد بیشتر و بزرگ‌تر از دیگر نمونه‌ها مشاهده می‌شود. این شکاف‌ها و ترک‌ها که در جهت عرضی نورد ایجاد شده‌اند، محل‌های اکستروژن فلز تمیز در حین نورد هستند. شیارهای موجود، که بر اثر شکستن لایه‌های اکسیدی و در نتیجه اکستروژن فلز تمیز درون این شیارها باعث ایجاد اتصال شده‌اند، در تصویر مشهود هستند.

طبق نظریه لایه نازک، برای ایجاد اتصال بین دو ورق در حالت جامد، لایه اکسید سطحی باید شکسته شود تا سطوح فلز تمیز دو ورق از هر دو سمت با هم در تماس مستقیم قرار گیرند



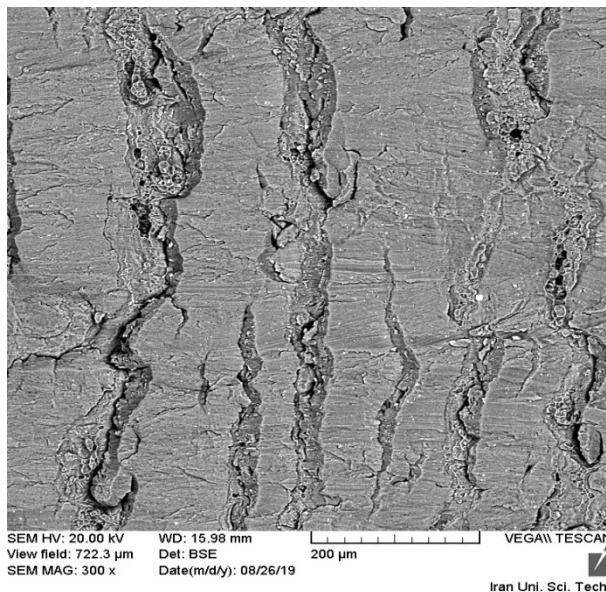
مناطق متصل شده در نمونه برس‌کاری شده در جهت موازی با نورد بیشتر از این مناطق در نمونه برس‌کاری شده جهت عرضی نورد (TD) مشاهده می‌شود که حاکی از اثر مثبت برس‌کاری در جهت موازی با جهت نورد (RD) در افزایش ترک‌های ایجاد شده طی فرایند نورد است. بنابراین، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطح شکست نمونه‌های گوناگون و بررسی تعداد شیارها و ابعاد آن‌ها، می‌توان ادعا کرد نمونه برس‌کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD) بیشترین مقدار سطوح اتصال‌یافته را دارد و اتصال آن محکم‌تر از دیگر نمونه‌ها است.



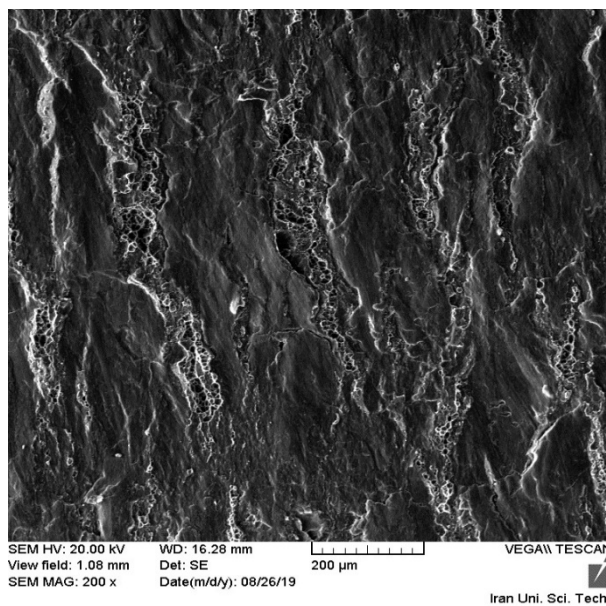
شکل ۵. تصویر SEM (الکترون‌های برگشتی) از سطح شکست نمونه برس‌کاری‌شده در جهت عرضی نورد (TD) پس از آزمایش لایه‌کنی

به‌منظور بررسی دلیل پایین‌بودن استحکام متوسط نمونه برس‌کاری شده RD-TD، تصویری میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) سطح شکست بررسی شد که در شکل ۶ ارائه شده است. شیارهای مشاهده شده در سطوح شکست، مناطق اتصال‌یافته در فصل مشترک را نشان می‌دهند. با بررسی دقیق‌تر سطح داخلی این شیارها، دیمپل‌هایی در این نواحی مشاهده می‌شود که حاکی از شکست نرم نمونه است. در حین آزمایش

و اتصال برقرار شود. بررسی سطوح شکست نمونه‌های برس‌کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD)، جهت عرضی نورد (TD) و ترکیب آن‌ها (RD-TD) در شکل‌های ۴ تا ۶ حاکی از آن است که برس‌کاری در جهت عرضی نورد (TD) باعث کاهش تعداد ترک‌های جهت عرضی نورد شده و همین موضوع کاهش اکستروود فلز تمیز را در پی داشته که به استحکام کمتر اتصال طی آزمایش لایه‌کنی منجر شده است.



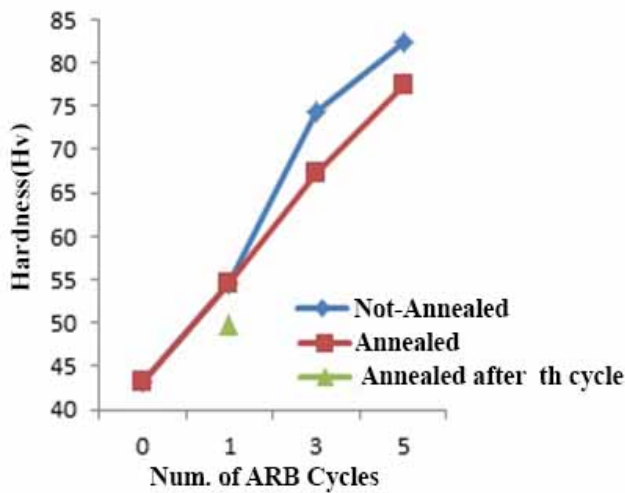
(الف)



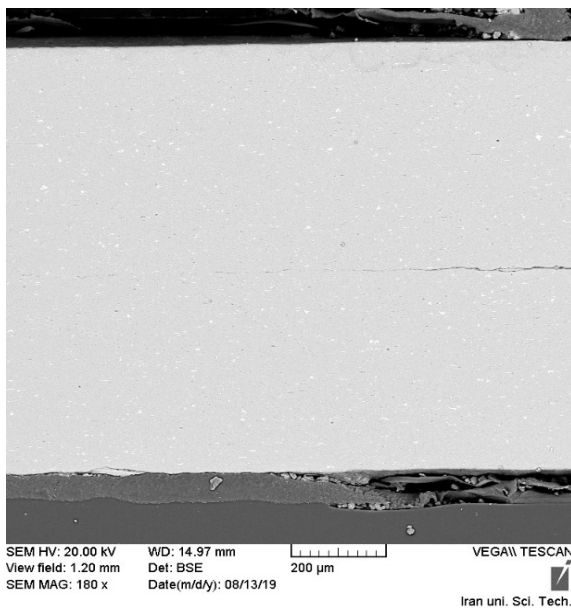
(ب)

شکل ۴. تصویر SEM (الف) الکترون‌های برگشتی و (ب) الکترون‌های ثانویه از سطح شکست پس از آزمایش لایه‌کنی برای نمونه برس‌کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD)

نورد (RD)، جهت عرضی نورد (TD) و ترکیب آن‌ها (RD-TD) پس از سیکل اول، پیش و پس از عملیات بازپخت، به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ آمده است. مطابق انتظار، به دلیل دمای بالای سیکل بازپخت و فعال شدن نفوذ اتمی کوتاه‌برد در فصل مشترک اتصال، ناپیوستگی بین دو لایه تا حد زیادی محو شده و اتصال بهبود یافته است. همچنین، با افزایش دما تا ۴۱۵ درجه سلسیوس در حین فرایند بازپخت، که افزایش تحرکات و نفوذ اتمی را در پی دارد، اتصال در مناطقی که اکستروود ناقص رخ داده است تقویت می‌شود و استحکام اتصال با ایجاد اتصال متالورژیکی بهبود می‌یابد.

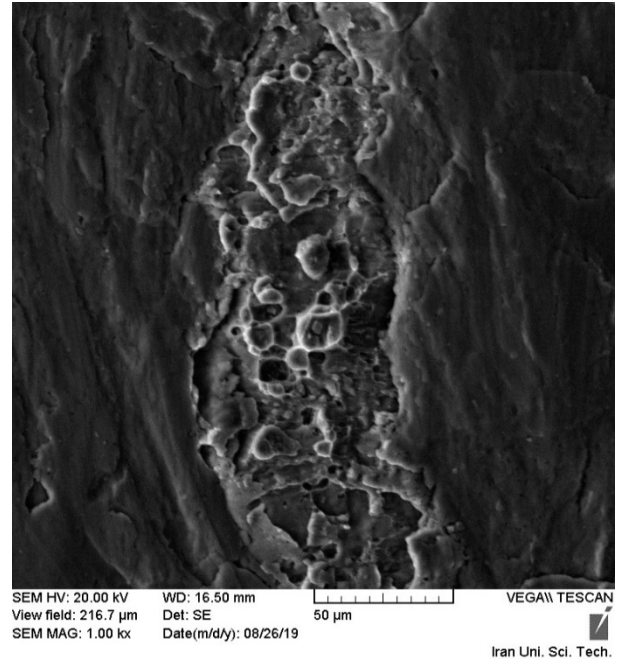


شکل ۷. تغییرات سختی در سیکل‌های گوناگون نورد تجمعی و اثر عملیات آنیل



(الف)

لایه‌کنی و با اعمال نیروی برشی بر نمونه، حفرات موجود در این شیارها به هم پیوسته و باعث ایجاد ترک در فصل مشترک می‌شوند. با افزایش نیروی اعمال شده، این ترک‌ها رشد می‌کنند و باعث شکست اتصال می‌شوند که این امر را پژوهش‌های دیگر نیز گزارش کرده‌اند [۲۰].



RD →

شکل ۶. تصویر SEM (الکترون ثانویه) از سطح شکست نمونه

برس‌کاری شده در جهت ترکیبی (RD-TD) پس از آزمایش لایه‌کنی

### ۳-۳- نتایج آزمایش سختی سنجی

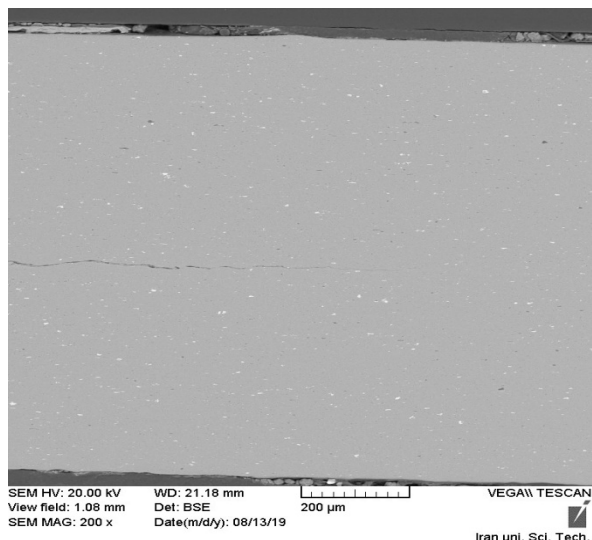
تغییرات سختی برحسب تعداد سیکل نورد و اثر عملیات بازپخت بر سختی در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل اعمال کار مکانیکی سرد در هر پاس نورد و کارسخت شدن فلز، سختی میانگین نمونه افزایش می‌یابد. در سیکل سوم و پنجم، به دلیل استفاده از دو نیمه بازپخت شده و بازپخت نشده، دو عدد سختی میانگین گزارش شده است، یکی برای قسمت بازپخت شده و دیگری برای قسمت بازپخت نشده است.

### ۳-۴- بررسی تأثیر عملیات بازپخت پس از فرایند اتصال

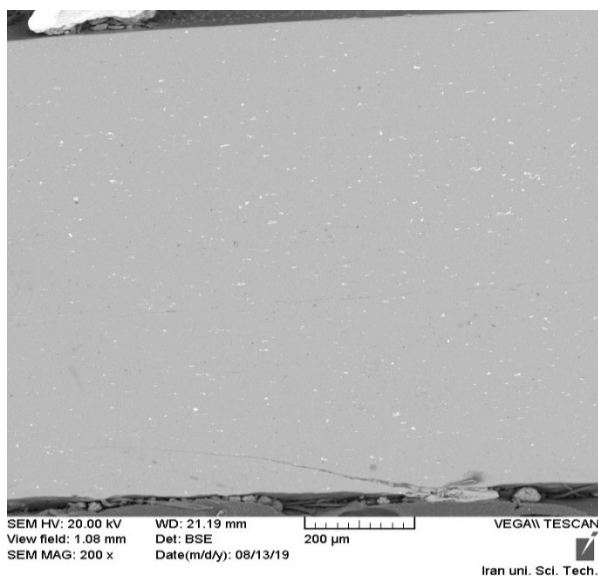
نورد تجمعی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع

ND-TD نمونه‌های برس‌کاری شده در جهات موازی با جهت



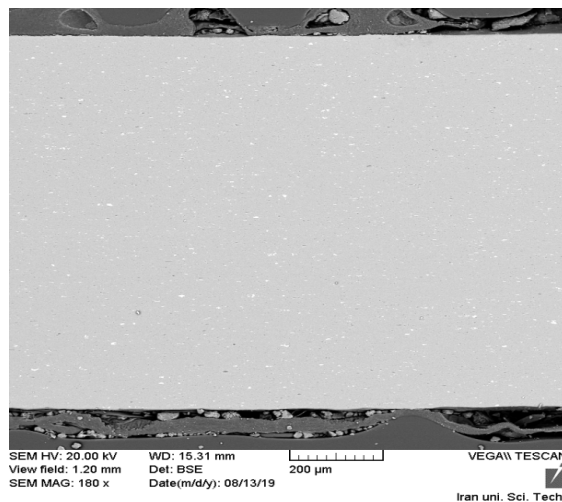
(الف)



(ب)

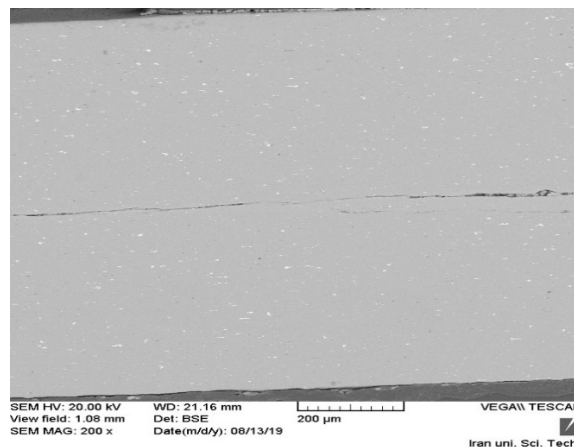
شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه برس کاری شده در جهت عرضی نورد و موازی با جهت نورد (RD-TD) پس از سیکل اول، الف) پیش از بازپخت و ب) پس از بازپخت

به منظور بررسی اتصال دو تسمه در فرایند نورد تجمعی، وقتی یک تسمه در حالت کارسخت شده و تسمه دیگر در حالت آئیل باشد، یک نیمه از نمونه‌های سیکل دوم و چهارم، پس از برش و تبدیل به دو نیمه مساوی، بازپخت می‌شود و نیمه دیگر به صورت کارسخت شده روی دیگری قرار می‌گیرد و به ترتیب تا سیکل سوم و پنجم تحت فرایند اتصال نورد تجمعی قرار می‌گیرند. به همین منظور، تصاویر SEM فصل مشترک دو تسمه پس از سیکل اول، سوم و پنجم اتصال نورد تجمعی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ (ب) و (ج)، اثر

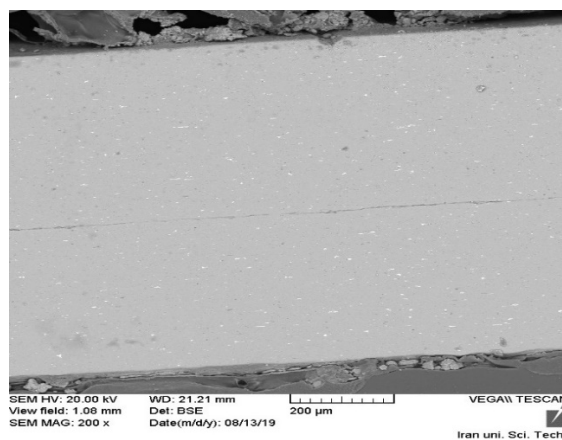


(ب)

شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه برس کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD) پس از سیکل اول، الف) پیش از بازپخت و ب) پس از بازپخت



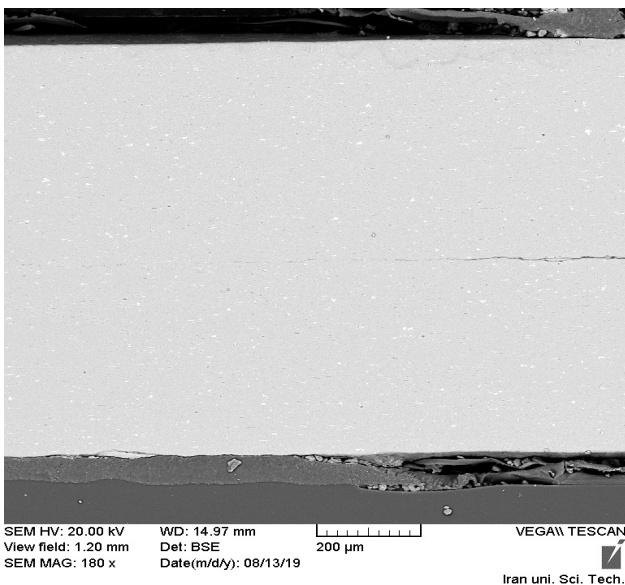
(الف)



(ب)

شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه برس کاری شده در جهت عرضی نورد (TD) پس از سیکل اول، الف) پیش از بازپخت و ب) پس از بازپخت

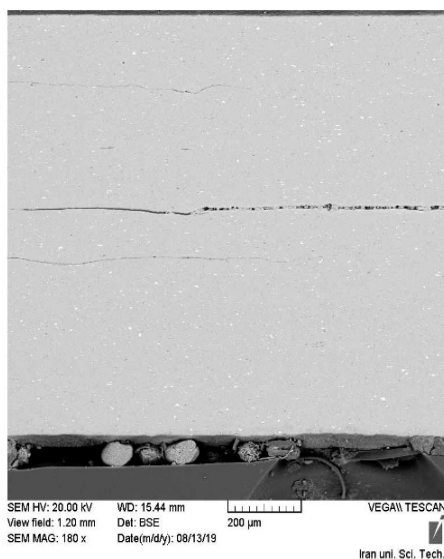
اول و دوم، به ترتیب تا سیکل دوم و چهارم، بدون هیچ‌گونه عملیات بازپخت، نورد شده‌اند که موجب کارسختی نمونه‌ها به‌خصوص نمونه سیکل چهارم می‌شود. استفاده از قسمت بازپخت نشده، که سختی بیشتری دارد، باعث می‌شود در سیکل پنجم، بر اثر نیروی فشاری غلتک‌ها، ترک‌های بیشتری در فصل مشترک ایجاد و امکان اکستروود بهتر فلز تمیز فراهم شود. همچنین، قسمت بازپخت شده، به دلیل سختی کمتر و حذف شدن تنش‌های پسماند، شرایط را برای سیلان ماده و اکستروود شدن در ترک‌های ایجاد شده بهبود می‌بخشد و باعث افزایش مناطق اتصال متالورژیکی در سطح شکست می‌شود که استحکام اتصال بیشتری را در پی دارد.



(الف)

Not-Annealed

Annealed



(ب)

عملیات بازپخت یک نیمه در بهبود اتصال قابل مشاهده است. اتصال قسمت بازپخت شده در سیکل‌های سوم و پنجم بهتر از قسمت بازپخت نشده است و ناپیوستگی‌های کمتری در قسمت بازپخت شده مشاهده می‌شود. همچنین، فصل مشترک بین دو نیمه بازپخت شده و بازپخت نشده، در سیکل سوم، اتصال مناسبی را نشان نمی‌دهد که این اثر در سیکل پنجم به مراتب کمتر مشاهده می‌شود و اتصال مناسبی بین قسمت بازپخت شده و بازپخت نشده برقرار شده است. دلیل این امر می‌تواند سختی بیشتر قسمت بازپخت نشده در سیکل چهارم در مقایسه با سیکل دوم باشد. دو نمونه، پس از انجام عملیات بازپخت بین سیکل اول و دوم، به ترتیب تا سیکل دوم و چهارم، بدون هیچ‌گونه عملیات بازپخت، نورد شده‌اند که موجب کارسختی نمونه‌ها به‌خصوص نمونه سیکل چهارم می‌شود. استفاده از قسمت بازپخت نشده، که سختی بیشتری دارد، باعث می‌شود در سیکل پنجم، بر اثر نیروی فشاری غلتک‌ها، ترک‌های بیشتری در فصل مشترک ایجاد و امکان اکستروود بهتر فلز تمیز فراهم شود. همچنین، قسمت بازپخت شده، به دلیل سختی کمتر و حذف شدن تنش‌های پسماند، شرایط را برای سیلان ماده و اکستروود شدن در ترک‌های ایجاد شده بهبود می‌دهد و باعث افزایش مناطق اتصال متالورژیکی در سطح شکست می‌شود که استحکام اتصال بیشتری را در پی دارد. همچنین، از تصاویر شکل ۱۱ مشخص است که پیوند بین لایه‌ها با افزایش تعداد سیکل اتصال نورد تجمعی بهبود یافته است، به طوری که مطابق شکل ۱۱ (ج)، پس از پنج سیکل نورد، اتصال مناسبی بین لایه‌ها برقرار و ناپیوستگی‌های کمی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ (ب) و (ج)، اثر عملیات بازپخت در بهبود اتصال قابل مشاهده است. اتصال قسمت بازپخت شده در هر دو سیکل سوم و پنجم بهتر از قسمت بازپخت نشده است و ناپیوستگی‌های کمتری در قسمت بازپخت شده مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱۱ (ب)، می‌توان گفت که فصل مشترک بین دو نیمه بازپخت شده و بازپخت نشده در سیکل سوم اتصال مناسبی را نشان نمی‌دهد که این اثر در سیکل پنجم به مراتب کمتر مشاهده می‌شود و اتصال مناسبی بین قسمت بازپخت شده و بازپخت نشده برقرار شده است که می‌تواند به دلیل سختی بیشتر قسمت بازپخت نشده در سیکل چهارم در مقایسه با سیکل دوم باشد. دو نمونه، پس از انجام عملیات بازپخت بین سیکل

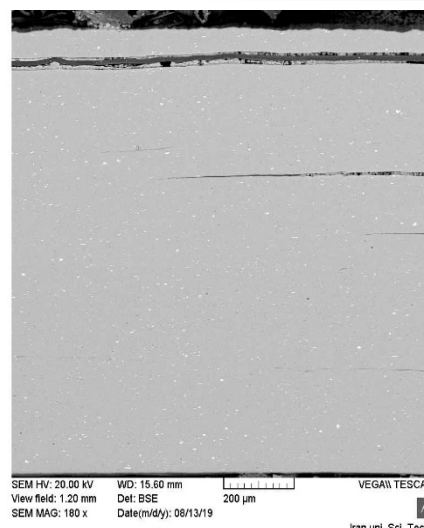
۴. استفاده از نیمه بازپخت شده و نیمه بازپخت نشده در سیکل‌های بالاتر باعث افزایش مناطق پیوندی می‌شود که استحکام اتصال بیشتری را در پی دارد؛ زیرا نیمه بازپخت نشده، که در سیکل قبلی کارسخت شده است، ترک‌های بیشتری خواهد داشت و نیمه بازپخت شده را با سهولت بیشتری درون ترک‌ها اکستروود می‌کند.

## ۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مسئول محترم آزمایشگاه متالوگرافی دانشکده مواد دانشگاه علم و صنعت تشکر و قدردانی می‌کنند.

Not-Annealed

Annealed



(ج)

شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های

برس‌کاری شده در جهت موازی با جهت نورد (RD)، (الف) سیکل اول، (ب) سیکل سوم و (ج) سیکل پنجم

## ۴- نتیجه‌گیری

از مطالعه تأثیر جهت برس‌کاری سطح پیش از نورد و همچنین انجام عملیات حرارتی بازپخت بر ریزساختار و استحکام اتصال حاصل از فرایند اتصال نورد تجمعی آلیاژ آلومینیم AA6061 نتایج کلی زیر حاصل شد:

۱. با توجه به نتایج آزمایش لایه‌کنی، برس‌کاری در جهت موازی با جهت نورد (RD) با استحکام متوسط  $0.60$  نیوتن بر میلی‌متر، در مقایسه با جهت RD-TD برابر  $0.34$  نیوتن بر میلی‌متر و در مقایسه با جهت TD برابر با  $0.35$  نیوتن بر میلی‌متر، بهترین اتصال بین دو ورق را پدید آورده است.

۲. بررسی سطوح شکست فصل مشترک نشان داد برس‌کاری در جهت موازی با جهت نورد (RD) باعث افزایش سختی سطح و ایجاد شیارهایی در جهت عرضی نورد می‌شود، درحالی‌که برس‌کاری در جهت عرضی نورد (TD) چنین شیارهایی را ندارد و مناطق اتصال یافته را کاهش می‌دهد.

۳. انجام عملیات بازپخت، پس از هر سیکل اتصال نورد تجمعی، باعث بهبود اتصال و کاهش سختی میانگین از  $74$  HV به  $67$  HV در سیکل سوم و از  $82$  HV به  $77$  HV در سیکل پنجم می‌شود.

## مراجع

- Murtha, S. J., "New 6XXX aluminum alloy for automotive body sheet applications", *SAE Transactions*, Vol. 104, Section 5: JOURNAL OF MATERIALS & MANUFACTURING, (1995), 657-666. <http://www.jstor.org/stable/44473273>
- Kaibyshev, R., Mazurina, I., "Mechanisms of grain refinement in aluminum alloys during severe plastic deformation", *Materials Science Forum*, Vol. 467, (2004), 1251-1260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.467-470.1251>
- Valiev, R. Z., "1- Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation (SPD)", *Nanostructured Metals and Alloys, Processing, Microstructure, Mechanical Properties and Applications, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, (2011), 3-39. <https://doi.org/10.1533/9780857091123.1.3>
- Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N., Sakai, T., "Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding (ARB) process", *Acta Materialia*, Vol. 47, No. 2, (1999), 579-583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6)
- Ghalehandi, S. M., Malaki, M., Gupta, M., "Accumulative roll bonding—A review", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 17, (2019), 3627. <https://doi.org/10.3390/app9173627>
- Arigela, V. G., Palukuri, N. R., Singh, D., Kolli, S. K., Jayaganthan, R., Chekhonin, P., Scharnweber, J., Skrotzki, W., "Evolution of microstructure and mechanical properties in 2014 and 6063 similar and dissimilar aluminium alloy laminates produced by accumulative roll bonding", *Journal of Alloys & Compounds*, Vol. 790, (2019), 917-927. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.231>
- Magalhães, D. C. C., Sordi, V. L., Kliauga, A. M., "Microstructure evolution of multilayered composite sheets of AA1050/AA7050 Al alloys produced by asymmetric accumulative roll-bonding", *Materials Characterization*, Vol. 162, (2020), 110226. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110226>
- Mansouri, H., Eghbali, B., Afrand, M., "Producing multi-layer composite of stainless steel/aluminum/copper by accumulative roll bonding (ARB) process", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 46, (2019), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.025>
- Avazzadeh, M., Alizadeh, M., Tayyebi, M., "Investigation of microstructure and tensile properties of CuZnAl shape memory alloy produced by accumulative roll bonding and subsequent heat treatment", *Modes Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 9, (2020), 2185-2195. <http://mme.modes.ac.ir/article-15-41388-en.html>
- Jalali, M., Farmanesh, F., Soltanipour, A., "Investigation of severe plastic deformation effect on microstructure of Ti-6Al-4V alloy", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 5, No. 1, (2016), 59-64. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2637.70325>

- by accumulative roll-bonding process", *Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 8, No. 3, (2021), 18-25. [https://ijmf.shirazu.ac.ir/article\\_6265\\_5e8638f243f573ef44739ff2d60d4b70.pdf](https://ijmf.shirazu.ac.ir/article_6265_5e8638f243f573ef44739ff2d60d4b70.pdf)
17. Zhang, X., Yu, Y., Liu, B., Zhao, Y., Ren, J., Yan, Y., Cao, R., Chen, J., "Microstructure characteristics and tensile properties of multilayer Al-6061/Ti-TA1 sheets fabricated by accumulative roll bonding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 275, (2020), 116378. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116378>
  18. Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., "The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 2, (2011), 191-197. <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9664-7>
  19. ASTM, Standard test method for peel resistance of adhesive bonds between flexible adherends by using a T-peel test, (2015). <https://www.astm.org/d1876-08r15e01.html>
  20. de Godoi, R. P., Magalhães, D. C. C., Avalos, M., Bolmaro, R. E., Sordi, V. L., Kliauga, A. M., "Microstructure, texture and interface integrity in sheets processed by asymmetric accumulative roll-bonding", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 771, (2020), 138634. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138634>
  11. Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., "Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, (2010), 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
  12. McBride, B. N. L., Clarke, K. D., Clarke, A. J., "Mitigation of edge cracking during accumulative roll bonding (ARB) of aluminum strips", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 55, (2020), 236-239. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.042>
  13. Yan, J., Lai, Q., Wang, J., Shen, Y., "Saturation controlled softening/hardening in pure aluminum processed by surface rotation rolling", *Scripta Materialia*, Vol. 182, (2020), 104-108. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.03.003>
  14. Jamaati, R., Toroghinejad, M. R., "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, (2010), 4508-4513. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.022>
  15. Li, L., Nagai, K., Yin, F., "Progress in cold roll bonding of metals", *Science and Technology Advanced Materials*, Vol. 9, No. 2, (2008), 023001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-6996/9/2/023001/meta>
  16. Rezaei, M., Toroghinejad, M., Ashrafizadeh, F., Asgari, H., Szpunar, J., "Textural evolution of 6061 aluminum alloy processed