مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1397، دوره 18، شماره 04، ص‌ص 32-38

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی خواص شکل‌پذیری کامپوزیت سه لایه برنج - فولاد IF- برنج

علیرضا باقری[1]، محمدرضا طرقی‌نژاد[2]، ابوذر طاهری‌زاده[3*]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، a.taheri@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 دی 1396

پذیرش: 26 بهمن 1396

ارائه در سایت: 24 اسفند 1396

کلید واژگان:

کامپوزیت لایه‌ای

خواص شکل‌پذیری

تبلور مجدد

آزمون اریکسن

ناهمسانگردی

چکیده

در این پژوهش، کامپوزیت سه لایه برنج- فولاد IF- برنج به روش فرایند نورد سرد پیوندی ساخته شد و خواص شکل‌پذیری آن مورد بررسی قرار گرفت. به‌دلیل کارسختی بالای کامپوزیت حین فرایند نورد ، نمونه‌ها در دماهای آنیل 500 تا 700°C و زمان ثابت 10 دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. خواص شکل‌پذیری کامپوزیت به وسیله آزمون‌های کشش، ناهمسانگردی و اریکسن ارزیابی شد. نتایج نشان داد عملیات حرارتی بعد از نورد باعث رخ دادن پدیده تبلور مجدد در کامپوزیت و در نتیجه کاهش استحکام کششی و افزایش توان کرنش سختی می‌شود. ارتفاع گنبد ایجاد شده در آزمون اریکسن قبل از عملیات حرارتی، 10.53 mm می‌باشد. با آنیل کردن کامپوزیت در دمای 500°C، ارتفاع گنبد به 14.62 mm می‌رسد. با بیشتر شدن دمای آنیل تا دمای 600°C به دلیل انرژی نقص در چیدن نسبتا بالای فولاد IF، تبلور مجدد تنها در لایه برنج رخ می‌دهد. اما با افزایش دمای آنیل به 650°C و محیا شدن نیروی محرکه، تبلور مجدد در همه لایه‌ها اتفاق افتاده و شیب تغییرات خواص شکل‌پذیری بیشتر می‌شود. به طوری که در دمای 700°C پدیده تبلور مجدد در کامپوزیت کامل شده و ارتفاع گنبد به بیشترین میزان خود یعنی 17.29 mm می‌رسد. همچنین با بیشتر شدن دمای آنیل، ناهمسانگردی قائم و صفحه‌ای به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با مقایسه خواص ناهمسانگردی کامپوزیت با ورق‌های برنج و فولاد IF در حالت تبلور مجددکامل، مشاهده شدکه تولیدکامپوزیت برنج- فولاد IF- برنج باعث بهبود ناهمسانگردی قائم در برنج و کاهش اثر منفی ناهمسانگردی صفحه ای در فولاد IF می‌گردد.

Investigation of formability of three-layered brass-IF steel-brass composite

Alireza Bagheri, Mohammad Reza Toroghinejad, Aboozar Taherizadeh*

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* 84156-83111, Isfahan, Iran, a.taheri@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 28 December 2017

Accepted 15 February 2018

Available Online 15 March 2018

Keywords:

Layered composite

Formability properties

Recrystallization

Erichsen test

Anisotropy

ABSTRACT

In this research, three-layered composite of brass-IF steel-brass was fabricated by cold roll bonding process (CRB) and formability of composite were investigated. Due to high work hardening of composite during rolling process, specimens were heat treated at annealing temperatures at 500°C through 700 °C for 10 min. Formability properties of composite were investigated by using tensile, anisotropy and Erichsen tests. The results showed that, heat treatment after rolling resulted in occurrence of recrystallization phenomenon in composite, consequently a reduction tensile strength and rising strain hardening rate. Dome height created by Erichsen test prior to heat treatment was 10.53 mm, by annealing composite at 500 °C, Dome height reached at 14.62 mm. By increasing annealing temperature to 600°C and owing to relatively high stacking fault energies of IF steel, recrystallization solitary occurred in brass layer. Nevertheless, as a result of upward trend of annealing temperature up to 650 °C as well as resultant driving force, recrystallization occurred in all layers and gradient of formability properties increased. As at 700 °C, recrystallization phenomenon was completed in the composite and dome height was peaked at 17.29 mm. Moreover, by increasing annealing temperature, normal anisotropy and planer anisotropy respectively increased and decreased. Anisotropy properties of composite in comparison with brass and IF steel during complete recrystallization, it was clear that production of brass-IF steel-brass composite caused to improve normal anisotropy in brass and reduce negative effects of planer anisotropy in IF steel.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های لایه‌ای تشکیل شده از لایه‌های مشابه و غیرمشابه به علت خواص منحصر به فرد مکانیکی، مدول الاستیک بالا، ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی مناسب در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. از جمله روش‌های کارآمد ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای حالت جامد می‌توان به تغییر شکل پلاستیک مانند فرایند نورد سرد پیوندی[1] اشاره نمود [2]. نورد سرد پیوندی یک فرایند اتصال بین فلزات مشابه و غیر مشابه است که در دمای

[1] Cold roll bonding (CRB)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Bagheri, M. R. Toroghinejad, A. Taherizadeh, Investigation of formability of three-layered brass-IF steel-brass composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 32-38, 2018 (in Persian)

اتاق جهت ساخت کامپوزیت لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند یک روش جوش‌کاری در حالت جامد است که با افزایش فشار بر لایه‌ها و ایجاد ترک‌های سطحی، فلز بکر از میان ترک‌ها سیلان کرده و پیوند بین لایه‌ها تشکیل می‌شود [3].

خواص مکانیکی و شکل‌پذیری کامپوزیت‌های لایه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. شکل‌پذیری کامپوزیت‌های لایه‌ای، توانایی آن‌ها در برابر تغییر شکل بدون ایجاد تخریب یا شکست است [4]. از مطالعات انجام گرفته بر شکل‌پذیری کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌توان به پژوهش صورت گرفته توسط معصومی و عمادالدین [5] اشاره کرد که شکل‌پذیری کامپوزیت ورق آلومینیوم با حضور ذرات SiC_p تولید شده به روش نورد سرد پیوندی را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش میزان ذرات SiC_p ارتفاع گنبد در آزمون اریکسن کاهش می‌یابد و در نتیجه شکل‌پذیری کم می‌شود. افزایش درصد ذرات ثانویه باعث افزایش تردی و کاهش درصد ازدیاد طول می‌گردد. درصد ازدیاد طول تاثیر مستقیم بر شکل‌پذیری داشته و در نتیجه افزایش میزان ذرات ثانویه باعث کاهش شکل‌پذیری می‌گردد. دانش‌منش و طاهری [6] تاثیر دما و زمان آنیل بعد نورد را بر شکل‌پذیری کامپوزیت سه لایه آلومینوم– فولاد St37- آلومنیوم بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که ارتفاع گنبد در آزمون اریکسن در ابتدا کاهش یافته و بعد از گذشت زمان، افزایش می‌یابد. در زمان بین 1.5 تا 5 ساعت آنیل، شکل‌پذیری به دلیل پیرکرنشی کاهش می‌یابد. با افزایش زمان آنیل تا 16 ساعت، به‌دلیل درشت شدن ذرات رسوبی، شکل‌پذیری بهبود پیدا می‌کند.

ترکیبات مختلفی از فلزها برای تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [7]. از ترکیب برنج و فولاد می‌توان یک کامپوزیت لایه‌ای پرکاربرد در صنعت تولید نمود [8]. آلیاژهای برنج علاوه بر هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب، از مقاومت به خوردگی مطلوبی برخوردارند [9]. یکی از خواص ویژه آلیاژ برنج با ریزساختار همگن و تکفاز α، شکل‌پذیری خوب آنهاست. مقدار ناهمسانگردی قائم (r_m) در آلیاژهای برنج حدود 1 بوده و با تغییر شکل برحسب بافت ریز ساختار تغییر می‌کند. در ورق‌های برنجی از طریق دست‌یابی به اندازه دانه‌های متوسط در حدود 20 تا 30 mμ و رسیدن به r_m حدود 1 و $|\Delta r| < 0.1$، می‌توان قطعاتی تقریبا بدون گوشواره تولید کرد. در این صورت توان کارسختی ناشی از تغییرشکل نیز بالا خواهد بود [10]. فولادها نیز از خواص مکانیکی و شکل‌پذیری مطلوبی برخوردارند. همچنین هزینه تولید فولاد نسبت به آلیاژ برنج کمتر است. اما فولادها در برابر خوردگی، بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند [11]. فولادهای عاری از عناصر بین‌نشین[1](IF) با ریزساختار تکفاز فریتی دارای مقادیر کربن و نیتروژن بسیار کمی می‌باشد.کاهش عناصر بین نشین در فولاد باعث می‌شود که در حین فرایند تغییر شکل پلاستیک، مانع بر سر حرکت نابجایی‌ها ایجاد نشود و نابجایی‌ها بتوانند به راحتی لغزش کنند [12]. این عوامل باعث تا فولاد IF از شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر فولادهای کم کربن برخوردار باشد [13]. با توجه به این‌که برنج خواص مکانیکی، هدایت الکتریکی و مقاومت به خوردگی مناسبی برخوردار بوده و همچنین فولاد IF دارای خواص شکل‌پذیری بسیار بالایی می‌باشد. با تولید کامپوزیت لایه‌ای برنج- فولاد IF- برنج به روش نورد سرد پیوندی، می‌توان شکل‌پذیری برنج و مقاومت به خوردگی فولاد را بهبود بخشید و از این کامپوزیت به‌دلیل قیمت پایین‌تر نسبت به برنج، در کاربردهای مختلف قطعات الکترونیکی که نیاز هم زمان به خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت به خوردگی دارند، استفاده نمود. هدف از این پژوهش تولید کامپوزیت لایه‌ای برنج- فولاد IF- برنج به روش نورد سرد پیوندی و بررسی شکل‌پذیری آن است.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- تولید کامپوزیت

در این پژوهش از فولاد عاری از عناصر بین‌نشین (IF) و برنج حاوی 90 درصد وزنی مس استفاده شد. ابتدا سطوح فولاد و برنج استون شویی شده و سپس سطوح توسط دو برس مجزا برسکاری شدند. در ادامه یک لایه فولاد در وسط دو لایه برنج قرار داده شد و مطابق "شکل 1" تحت فرایند نورد سرد قرار گرفتند. فرایند نورد سرد پیوندی به وسیله دستگاه نورد با ظرفیت 40 تن و قطر غلتک 230 mm و سرعتی برابر با 4 m/min بدون حضور روان‌کار انجام شد. کاهش ضخامت اعمال شده روی همه نمونه‌ها، 65٪ بوده است. به‌دلیل کارسختی بالای کامپوزیت حین فرایند نورد و بهبود شکل‌پذیری آن، نمونه‌ها در 5 دمای مختلف 650،600،550،500 و ℃ 700 و زمان ثابت 10 دقیقه آنیل شدند. سپس خواص شکل‌پذیری کامپوزیت در این حالت‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

2-2- آزمون کشش

استحکام کششی کامپوزیت با استفاده از آزمون کشش تک محوره مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کشش براساس استاندارد ASTM E8M و موازی با جهت نورد کامپوزیت تهیه شدند. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه کشش مدل هانسفیلد با نرخ کرنش اولیه‌ی $1.67 \times 10^{-4}\ s^{-1}$ مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از انجام آزمون کشش، منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌های رسم شد. با توجه به این‌که مقدار توان کرنش سختی (n-value) با مقدار کرنش حقیقی (ε_{UTS}) در نقطه گلویی شدن برابر است. مقدار n به‌وسیله رابطه (1) و با استفاده از مقدار کرنش مهندسی در نقطه گلویی شدن، محاسبه شد [14].

$$n = \varepsilon_{UTS} = \ln(e_{UTS} + 1) \quad (1)$$

2-3- آزمون ناهمسانگردی

به منظور بررسی رفتار ناهمسانگردی کامپوزیت، براساس استاندارد ASTM E517 سه نمونه‌ی آزمون کشش در راستای 0، 45 و 90 درجه نسبت به جهت نورد مطابق "شکل 2" از کامپوزیت تهیه شد. برای محاسبه ناهمسانگردی در هر جهت، نسبت کرنش حقیقی در جهت پهنا (ε_w) به کرنش حقیقی در جهت ضخامت (ε_t) در سه میزان درصد ازدیاد طول 10،

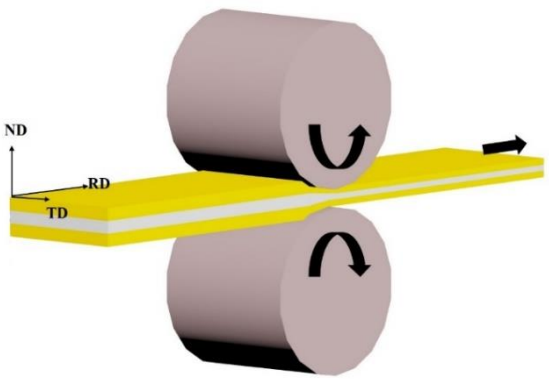

Fig. 1 Schematic illustration of the cold roll bonding process.

شکل 1 شماتیکی از فرایند نورد سرد کامپوزیت لایه‌ای

[1] Interstitial free steel

15 و 20٪ محاسبه شد. برای محاسبه ناهمسانگردی قائم (r_m) و ناهمسانگردی صفحه‌ای (Δr) به ترتیب از رابطه (2) و (3) استفاده شد [15].

$$r_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad (2)$$

$$\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2 \quad (3)$$

4-2- آزمون اریکسن

برای بررسی خواص شکل‌پذیری کامپوزیت از آزمون اریکسن[1] براساس استاندارد ASTM E643-09 استفاده شد. نمونه توسط نگه‌دارنده با نیروی 7.5 kN ثابت نگه‌داشته شد و سپس با فشاری که از طریق سنبه نیم کروی به قطر 20 mm به سطح کامپوزیت اعمال می‌شد، تغییر شکل پلاستیک در ورق ایجاد شد. میزان ارتفاع ایجاد شده توسط سمبه قبل از ایجاد ترک بر روی سطح اندازه‌گیری شد.

3- نتایج و بحث

3-1- استحکام کششی

شکل 3 تاثیر افزایش دمای آنیل در زمان ثابت را بر نمودار تنش -کرنش مهندسی کامپوزیت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود آنیل بعد از نورد موجب کاهش استحکام و افزایش درصد ازدیاد کامپوزیت می‌شود. استحکام کششی کامپوزیت قبل از عملیات حرارتی، حدود 500 MPa بوده است. آنیل کامپوزیت در دمای 500 °C باعث کاهش فاحش استحکام به 317 MPa می‌شود. عملیات حرارتی باعث رخ دادن پدیده بازیابی و تبلور مجدد در کامپوزیت شده و درنتیجه چگالی نابجایی‌ها و میزان کارسختی کاهش می‌یابد [16]. این امر سبب کاهش سختی و استحکام کامپوزیت و افزایش درصد ازدیاد طول در آن می‌شود. با افزایش دمای آنیل به 600 °C در زمان ثابت، این روند نزولی ادامه داشته و استحکام کششی کامپوزیت به 288 MPa می‌رسد. در دمای 650 °C، شیب تغییرات استحکام کششی بیشتر شده که حاکی از رخ دادن تغییراتی در ریزساختار است. اما در دمای 700 °C استحکام تغییر چندانی نکرده و تنها درصد ازدیاد طول افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که تبلور مجدد در کل کامپوزیت کامل شده است. با کامل شدن تبلور مجدد در همه لایه‌های کامپوزیت، اثر کارسختی ناشی از تغییرشکل پلاستیک کاملا از بین می‌رود. درنتیجه استحکام کششی به کمترین میزان خود رسیده و درصد ازدیاد طول در حداکثر مقدار خود قرار می‌گیرد [17].

در دیگر تحقیقات صورت گرفته در مورد تاثیر عملیات حرارتی بر نمودار تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت سه لایه آلومینیوم- فولاد زنگ‌نزن 304L- آلومینیوم مشاهده شده است که با افزایش دمای آنیل و به علت تشکیل ذرات بین فلزی میان لایه‌ها، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول کامپوزیت از میزان واقعی خود کمتر می‌شوند [7]. اما در کامپوزیت برنج- فولاد IF- برنج امکان انحلال فاز مس و فریت در یکدیگر وجود ندارد. به همین دلیل با افزایش دمای آنیل و عدم امکان تشکیل ذرات بین فلزی، لایه‌ها به‌صورت یکنواخت تا مرحله شکست کشیده می‌شوند.

برای بررسی علت بیشتر شدن شیب تغییرات استحکام کششی در دمای آنیل 650 °C، ریزساختار کامپوزیت بعد از عملیات حرارتی در دماهای 600 و 650 °C مورد ارزیابی قرار گرفت. "شکل 4" ریز ساختار لایه‌های کامپوزیت در کاهش ضخامت 65 درصد را قبل از آنیل نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود که دانه ها بوصورت تغییر شکل یافته در راستای نورد کشیده شده اند.

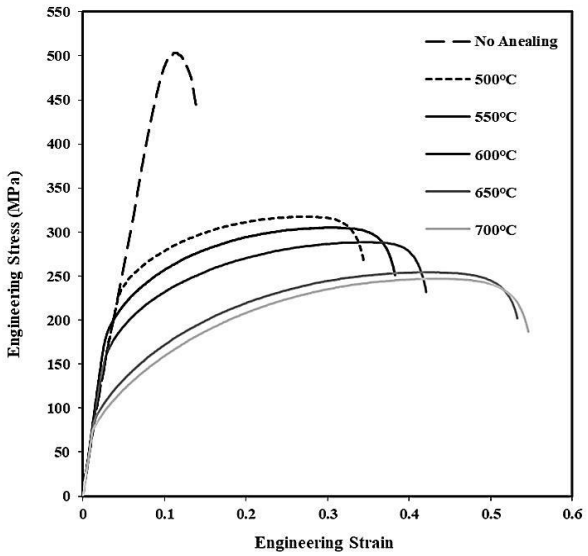

Fig. 3 Effect of post roll annealing on engineering stress-strain curves of composite

شکل 3 تاثیر افزایش آنیل بعد از نورد بر نمودار تنش -کرنش مهندسی کامپوزیت

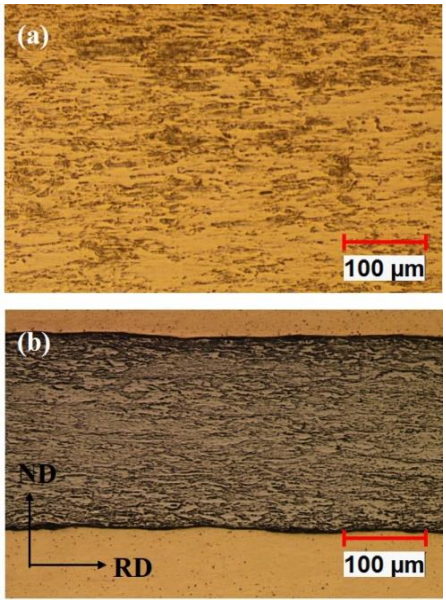

Fig. 4 Microstructure of composite (a) brass and (b) IF steel before annealing

شکل 4 ریزساختار کامپوزیت (a) برنج و (b) فولاد IF قبل از آنیل

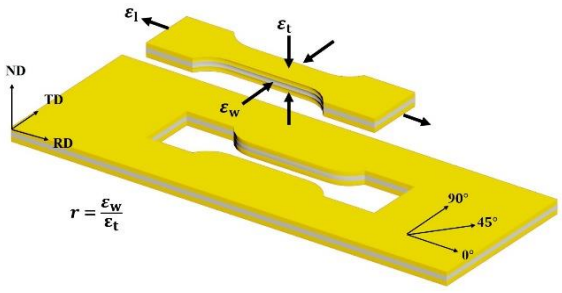

Fig. 2 Schematic illustration of the anisotropy test specimens

شکل 2 شماتیکی از نمونه‌های آزمون ناهمسانگردی

[1] Erichsen test

"شکل 5 و 6" به ترتیب ریز ساختار لایه‌های کامپوزیت بعد آنیل در دماهای 600 و 650 °C در زمان ثابت را نشان می‌دهد. در "شکل 5(a)" مشاهده می‌شود که با رخ دادن تبلور مجدد در برنج، شکل دانه از حالت کشیده خارج شده و به‌صورت ریز و هم محور در آمده، ولی در فولاد IF به دلیل عدم رخ دادن تبلور مجدد بدون تغییر مانده است (شکل 5(b)). در "شکل 6" با رخ دادن تبلور مجدد در هر دولایه در دمای 650 °C، شکل دانه ها هم محور و عاری از اثرات کارسختی شده است. در فولاد IF با انرژی نقص در چیده شدن نسبتا بالا (حدود 200 mJ/m^2)، صعود نابجایی‌ها سریع بوده و بازیابی قابل توجهی رخ دهد. به همین دلیل انرژی ذخیره شده در نمونه بیشتر صرف بازیابی شده و نیروی محرکه برای رخ دادن تبلور مجدد کاهش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که پدیده تبلور مجدد، دیرتر و در دماهای بالاتری که نیروی محرکه مهیا شود، رخ دهد [18]. برعکس در برنج (90 درصد وزنی مس) با ساختار تکفاز α و با انرژی نقص در چیده شدن کم(حدود 40 mJ/m^2)، بازیابی بدلیل فاصله نسبتا زیاد نابجایی‌های جزئی تا حدودی مشکل است. به همین دلیل بازیابی ناچیزی در ساختار نابجایی‌ها، قبل از تبلور مجدد اتفاق می‌افتد و نیروی محرکه، بیشتر صرف تبلور مجدد می‌شود. در نتیجه پدیده تبلور مجدد در دماهای پایین‌تری در برنج اتفاق می‌افتد [10]. این عوامل باعث می‌شوند که با عملیات حرارتی کامپوزیت تا دمای 600 °C، تبلور مجدد تنها در لایه برنج رخ دهد. با افزایش دمای آنیل به 650 °C و مهیا شدن نیروی محرکه، تبلورمجدد در همه لایه اتفاق می‌افتد و در نتیجه شیب تغییرات استحکام کششی بیشتر می‌شود.

3-2- توان کرنش سختی

"شکل 7" توان کرنش سختی کامپوزیت را در دماهای مختلف آنیل نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش دمای آنیل بعد از نورد موجب بیشتر شدن توان کرنش سختی یا قابلیت تغییر شکل پلاستیک همگن کامپوزیت می‌شود. در دمای آنیل 500 °C، توان کارسختی کامپوزیت 0.26

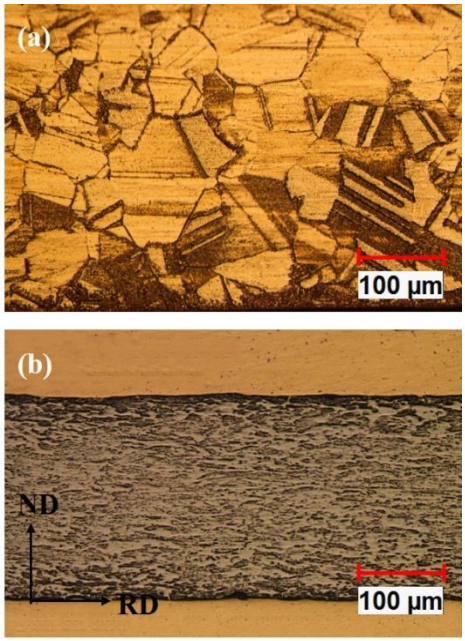

Fig. 5 Microstructure of composite (a) brass and (b) IF steel annealed at 600°C

شکل 5 ریزساختار کامپوزیت (a) برنج و (b) فولاد IF آنیل شده در دمای 600°C

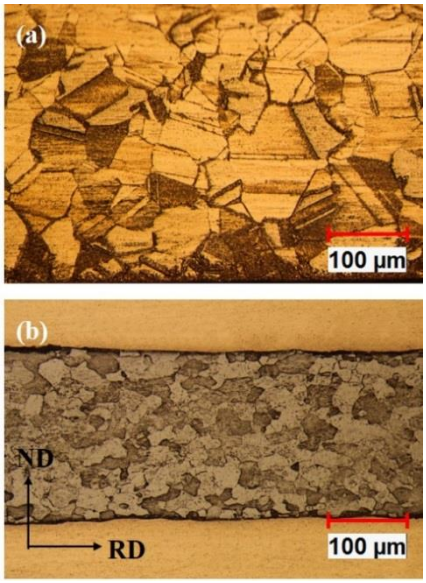

Fig. 6 Microstructure of composite (a) brass and (b) IF steel annealed at 650°C

شکل 6 ریزساختار کامپوزیت (a) برنج و (b) فولاد IF آنیل شده در دمای 650°C

بوده و با افزایش دمای آنیل به 600 °C در زمان ثابت، مقدار n به 0.31 می‌رسد. آنیل بعد از نورد موجب کاهش کارسختی و افزایش شکل‌پذیری می‌شود. این امر باعث بیشتر شدن مقدار n شده که در نتیجه موجب افزایش قابلیت تغییر شکل یکنواخت کامپوزیت می‌گردد [19]. در دمای 650 °C و با رخ دادن تبلورمجدد در همه لایه‌ها، شیب تغییرات توان کرنش سختی بیشتر شده است. در نهایت در دمای 700 °C که تبلور مجدد در کامپوزیت کامل می‌شود، مقدار توان کرنش سختی به بیشترین میزان خود یعنی 0.37 می‌رسد. لذا کامپوزیت آنیل شده در دمای 700 °C، از شکل‌پذیری همگن بیشتری نسبت به سایر حالت‌ها برخوردار است.

3-3- ناهمسانگردی

ناهمسانگردی ورق‌های اولیه و کامپوزیت در منطقه تغییر شکل پلاستیک همگن و در سه میزان درصد ازدیاد طول 10، 15 و 20٪ بررسی گردید. "شکل 8" مقدار ناهمسانگردی قائم کامپوزیت را در دماهای مختلف آنیل و زمان ثابت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دمای آنیل باعث بیشتر شدن ناهمسانگردی قائم کامپوزیت می‌شود. در دمای آنیل °C

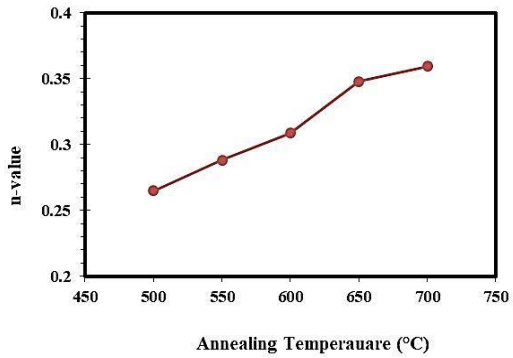

Fig. 7 Effect of annealing temperatures on variation of strain hardening rate of composite

شکل 7 تاثیر دمای آنیل بر توان کارسختی کامپوزیت

500، مقدار r_m کامپوزیت 0.83 بوده و با افزایش دمای آنیل به 600 °C در زمان ثابت، ناهمسانگردی قائم کامپوزیت به 1.12 می‌رسد. این روند صعودی ادامه داشته به‌طوری که در دمای 700 °C که تبلور مجدد در کامپوزیت کامل می‌شود، مقدار r_m برابر 1.56 می‌گردد. این امر نشان می‌دهد که کامپوزیت در حالت تبلور مجدد کامل، از قابلیت کشش عمیق‌پذیری نسبتا خوبی برخوردار است. آنیل بعد از نورد موجب کاهش کارسختی و افزایش شکل‌پذیری می‌شود. لذا مقدار ناهمسانگردی در جهات مختلف افزایش می‌یابد. این امر باعث بیشتر شدن ناهمسانگردی قائم در کامپوزیت می‌گردد [20].

"شکل 9" تاثیر عملیات حرارتی را بر ناهمسانگردی صفحه‌ای کامپوزیت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دمای آنیل در زمان ثابت باعث کاهش قدر مطلق ناهمسانگردی صفحه‌ای کامپوزیت می‌شود. در دمای آنیل 500 °C، مقدار Δr کامپوزیت برابر 0.51- بوده و با افزایش دمای آنیل به 600 °C، ناهمسانگردی صفحه‌ای کامپوزیت به 0.38- می‌رسد. فرایند آنیل و پدیده بازیابی و تبلور مجدد در کامپوزیت باعث تغییر بافت و جهت‌گیری دانه‌ها به شکل اولیه می‌شود. به‌صورتی که شکل دانه‌ها از کشیدگی در راستای نورد به هم محور تغییر می‌کند. و مقدار ناهمسانگردی در جهات مختلف، به یکدیگر نزدیک می‌شود [21]. این امر موجب کاهش مقدار $|\Delta r|$ می‌گردد. این روند نزولی ادامه داشته بطوری که با کامل شدن تبلور مجدد در کامپوزیت در دمای 700 °C، مقدار Δr به 0.17- رسیده است.

برای قابلیت مناسب شکل‌پذیری سرد، ورق باید مقدار بالای r_m و مقدار کم Δr باشد [22]. مقایسه "شکل‌های 7 و 8" نشان می‌دهد که کامپوزیت آنیل شده در دمای 700 °C، به‌دلیل مقدار r_m بیشتر و مقدار $|\Delta r|$ کمتر نسبت به سایر نمونه‌ها، از قابلیت شکل‌پذیری بالاتری برخوردار است.

جدول 1 مقدار ناهمسانگردی قائم و صفحه‌ای ورق‌های برنج، فولاد IF و کامپوزیت را در حالت تبلور مجدد کامل (بدون هیچ گونه اثر کارسختی) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود فولاد IF از مقدار r_m بالایی برخوردار بوده که باعث قابلیت بالای کشش عمیق‌پذیری در آن می‌شود. ناهمسانگردی قائم برنج حدودا نصف فولاد IF بوده که نشان دهنده شکل‌پذیری بهتر فولاد IF نسبت به برنج است. اما میزان ناهمسانگردی صفحه‌ای در برنج کمتر بوده که باعث جلوگیری از هدر رفت ورق در حین فرایند کشش عمیق می‌شود [23]. همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود مقدار ناهمسانگردی قائم و صفحه‌ای کامپوزیت تبلورمجدد کامل یافته، بین مقادیر r_m و Δr ورق‌های برنج و فولاد IF قرار دارد. به‌عبارت دیگر تولیدکامپوزیت برنج- فولاد IF- برنج، باعث بهبود ناهمسانگردی قائم در برنج

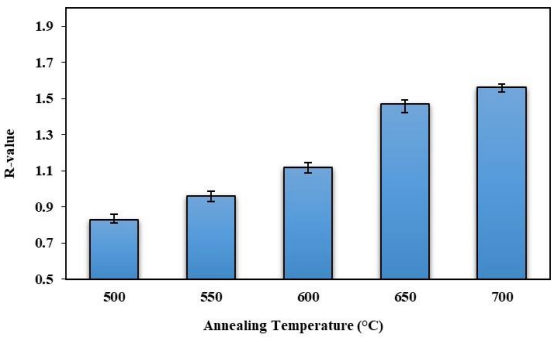

Fig. 8 Effect of annealing temperatures on normal anisotropy

شکل 8 تاثیر آنیل بعد از نورد بر ناهمسانگردی قائم کامپوزیت

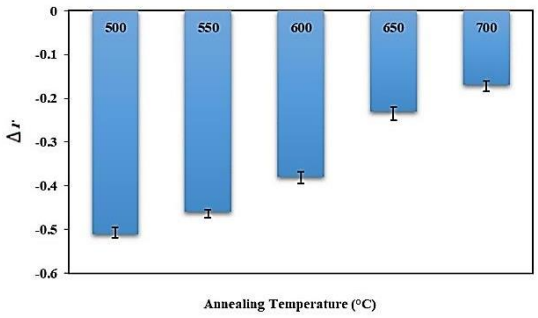

Fig. 9 Effect of annealing temperatures on planer anisotropy

شکل 9 تاثیر آنیل بعد از نورد بر ناهمسانگردی قائم کامپوزیت

جدول 1 ناهمسانگردی قائم و صفحه‌ای ورق‌های برنج، فولاد IF و کامپوزیت در حالت تبلور مجدد کامل

Table 1 Normal and planer anisotropy of brass, IF steel and composite during complete recrystallization

ماده	r_m	Δr
برنج	0.96	-0.12
فولاد IF	2.02	-0.41
کامپوزیت در حالت تبلور مجدد کامل	1.56	-0.17

و کاهش اثر منفی ناهمسانگردی صفحه ای در فولاد IF می‌شود.

4-3- ارتفاع گنبد در آزمون اریکسن

"شکل 10" تاثیر عملیات حرارتی را بر شکل‌پذیری کامپوزیت در حین آزمون اریکسن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دمای آنیل بعد از نورد موجب بیشتر شدن ارتفاع گنبد در حین آزمون اریکسن می‌شود. ارتفاع گنبد ایجاد شده در کامپوزیت قبل از عملیات حرارتی، 10.53 mm بوده است. با آنیل کردن کامپوزیت در دمای 500 °C، ارتفاع گنبد به طور چشم‌گیر افزایش یافته و به 14.62 mm می‌رسد. با افزایش دمای آنیل به 650 °C در زمان ثابت و رخ دادن تبلور مجدد در هر دولایه، شیب افزایش ارتفاع گنبد بیشتر شده و ارتفاع آن به 17.03 mm می‌رسد. این روند صعودی ادامه داشته به‌طوری که در دمای 700 °C که تبلور مجدد در کامپوزیت کامل می‌شود، ارتفاع گنبد به 17.29 mm رسیده است. آنیل بعد از نورد موجب کاهش سختی و استحکام کامپوزیت شده و در نتیجه شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد. با رخ دادن پدیده تبلور مجدد در کامپوزیت، خواص شکل‌پذیری بهبود یافته و با کامل شدن تبلور مجدد، شکل‌پذیری کامپوزیت به بهترین شرایط خود می‌رسد. از طرفی افزایش بیش از حد دمای آنیل باعث درشت شدن دانه‌ها و ایجاد اثر نامطلوب پوست پرتقالی شدن در سطح نمونه می‌شود [24].

در دیگر تحقیقات صورت گرفته در مورد تاثیر عملیات حرارتی بر شکل‌پذیری کامپوزیت سه لایه آلومینوم– فولاد St37- آلومنیوم مشاهده شده است که در ابتدا فرایند آنیل و به‌دلیل رخ دادن پیرکرنشی در کامپوزیت، شکل‌پذیری کاهش پیدا کرده و به پایین‌ترین حد خود می‌رسد. با افزایش دما و درشت شدن ذرات رسوبی، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد [6]. اما در کامپوزیت برنج- فولاد IF- برنج با افزایش دمای آنیل و به‌دلیل عدم تشکیل فازها و رسوب‌ها، شکل‌پذیری به طور پیوسته بهبود می‌یابد.

"شکل 11" نمونه‌های تغییر شکل یافته بعد از آزمون اریکسن را در سه حالت (a) بدون آنیل، آنیل شده در دمای(b) 500 °C و (c) 700 °C نشان

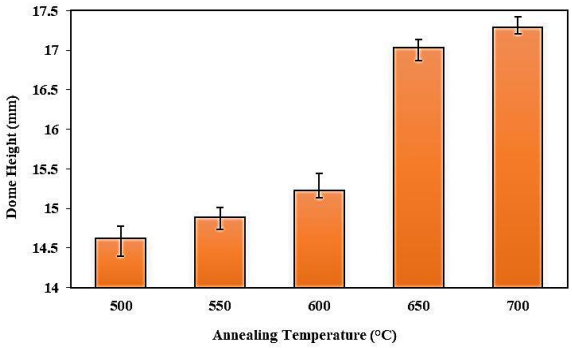

Fig. 10 Effect of annealing temperatures on dome height

شکل 10 تاثیر آنیل بعد از نورد بر ارتفاع گنبد ایجاد شده درکامپوزیت

می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با آنیل کردن کامپوزیت و افزایش دمای آن، ارتفاع گنبد و طول ترک ایجاد شده در پایان آزمون، افزایش یافته است. آنیل بعد از نورد باعث افزایش توان کارسختی می‌شود. در نتیجه کامپوزیت می‌تواند به میزان بیشتری تغییر شکل همگن انجام دهد و دیرتر در آن شکست اتفاق بیفتد. با افزایش دمای آنیل، توانایی تغییر شکل پلاستیک در کامپوزیت بیشتر شده و درمراحل پایانی آزمون اریکسن، میزان کارسختی بیشتر در آن افزایش می‌یابد. لذا در هنگام شکست به دلیل تردی بالاتر، ترک با طول بیشتری در نمونه ایجاد می‌شود [25].

همچنین در "شکل 11" مشاهده می‌شود که ترک، در جداره گنبد تشکیل شده و در راس آن مشاهده نمی‌شود. اگر اصطکاک بین سنبه و ورق به اندازه‌ای باشد که از لغزش جلوگیری نماید، تغییر شکل پلاستیک با تماس هر جزئی از ورق با سنبه متوقف می‌شود. اما دیگر قسمت‌های آزاد ورق بین قالب و سنبه در حالت دو محوری کشیده می‌شود. در این صورت کرنش شعاعی $\varepsilon_r = \varepsilon_1$ و کرنش محیطی $\varepsilon_\theta = \varepsilon_2$ مثبت خواهند بود. بنابراین در

Fig. 11 Stereomicroscopy picture of the Erichsen cup surface of composite in three modes (a) before annealing, annealed at (b) 500℃ and (c) 700℃

شکل 11 تصاویر نمونه‌های تغییر شکل یافته بعد از آزمون اریکسن در سه حالت (a) قبل از آنیل، آنیل شده در دمای (b) 500℃ و (c) 700℃

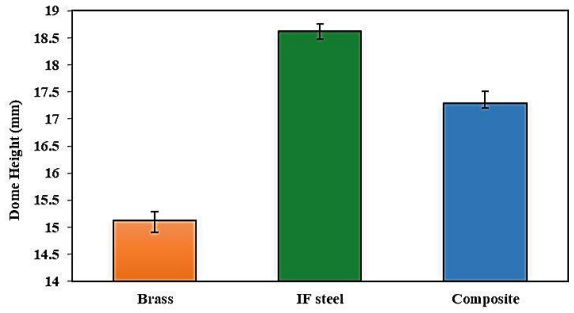

Fig. 12 Dome height created by Erichsen test in brass, IF steel and composite during complete recrystallization

شکل 12 ارتفاع گنبد ایجاد شده حین آزمون اریکسن در برنج ، فولاد IF و کامپوزیت در حالت تبلورمجدد کامل

نقاط تماس می‌تواند نازک شدن موضعی شروع شود که منجر به تخریب می‌شود. برعکس اگر اصطکاک بین سطح تماس ورق و سنبه کمتر شود، تغییر شکل ورق در قسمت آزاد و هم در قسمتی که در تماس با سنبه است انجام می‌گیرد و جزئی که در آن لغزش و تخریب رخ نداده به سمت مرکز انتقال می‌یابد [26]. که این امر نشان‌دهنده می‌دهد در حین آزمون اریکسن، اصطکاک مناسب بین سنبه و کامپوزیت وجود داشته است.

در حالت تبلور مجدد کامل، سختی و استحکام برنج و فولاد IF به به پایین ترین مقدار خود رسیده و در نتیجه قابلیت شکل‌پذیری به بیشترین مقدار خود می‌رسد. ارتفاع گنبد ایجاد شده حین آزمون اریکسن در ورق‌های برنج و فولاد IF در حالت تبلور مجدد کامل به ترتیب 15.13 و 18.63 mm می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 12" مشاهده می‌شود ارتفاع گنبد کامپوزیت در حالت تبلور مجدد کامل (آنیل در دمای ℃ 700) بین ارتفاع گنبد دو فلز پایه قرار دارد. به‌عبارت دیگر تولیدکامپوزیت سه لایه به روش نورد سرد پیوندی، باعث بهبود شکل‌پذیری برنج شده است که نشان از تاثیر بسزای فولاد IF بر شکل‌پذیری کامپوزیت دارد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت سه لایه برنج- فولاد IF- برنج به روش فرایند نورد سرد پیوندی ساخته شد. نمونه‌ها در 5 دمای مختلف 650،600،550،500 و ℃ 700 و زمان ثابت 10 دقیقه آنیل شدند. سپس خواص شکل‌پذیری کامپوزیت در این حالت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد:

1- عملیات حرارتی کامپوزیت باعث رخ دادن پدیده بازیابی و تبلور مجدد در آن شده و درنتیجه چگالی نابجایی‌ها و میزان کارسختی کاهش می‌یابد. این امر سبب کاهش استحکام و افزایش توان کرنش سختی کامپوزیت می‌شود.

2- افزایش دمای آنیل باعث بهبود شکل‌پذیری کامپوزیت می‌گردد. با بیشتر شدن دمای آنیل تا دمای ℃ 600 به دلیل انرژی نقص در چیدن نسبتا بالای فولاد IF، تبلور مجدد تنها در لایه برنج رخ می‌دهد. اما با افزایش دمای آنیل به ℃ 650 و محیا شدن نیروی محرکه، تبلور مجدد در همه لایه‌ها اتفاق افتاده و شیب تغییرات خواص شکل‌پذیری بیشتر می‌شود. به طوری که در دمای ℃ 700 پدیده تبلور مجدد در کامپوزیت کامل شده و شکل‌پذیری به بیشترین میزان خود می‌رسد.

3- افزایش دمای آنیل باعث بیشتر شدن ناهمسانگردی قائم و کاهش ناهمسانگردی صفحه‌ای کامپوزیت می‌شود. ناهمسانگردی قائم و

صفحه‌ای کامپوزیت تبلورمجدد کامل یافته، بین مقادیر r_m و Δr برنج و فولاد IF قرار دارد. به عبارت دیگر تولیدکامپوزیت سه لایه به روش نورد سرد پیوندی، باعث بهبود ناهمسانگردی قائم در برنج و کاهش اثر منفی ناهمسانگردی صفحه ای در فولاد IF می‌گردد.

4- افزایش دمای آنیل بعد از نورد موجب بیشتر شدن ارتفاع گنبد در کامپوزیت حین آزمون اریکسن می‌شود. ارتفاع گنبد کامپوزیت در حالت تبلور مجدد کامل (دمای 700 °C) بین ارتفاع گنبد دو فلز پایه قرار دارد. این امر نشان می‌دهد، تولیدکامپوزیت لایه‌ای برنج- فولاد IF- برنج موجب بهبود شکل‌پذیری برنج شده است که نشان از تاثیر بسزای فولاد IF بر شکل‌پذیری کامپوزیت دارد.

5- مراجع

[1] M. Naseri, M. Reihanian, E. Borhani, Bonding behavior during cold roll-cladding of tri-layered Al/brass/Al composite, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, No. 1, pp. 125-137, 2016 .
[2] C. Li, C. Chi, P. Lin, H. Zhang, W. Liang, Deformation behavior and interface microstructure evolution of Al/Mg/Al multilayer composite sheets during deep drawing, *Materials and Design*, Vol. 77, No. 1, pp. 15-24, 2015 .
[3] R. Jamaati, M. Toroghinejad, Cold roll bonding bond strengths: review, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011 .
[4] S. Nambu, M. Michiuchi, J. Inoue, T. Koseki, Effect of interfacial bonding strength on tensile ductility of multilayered steel composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1936-1941, 2009 .
[5] M. Masoumi, E. Emadoddin, Interface characterization and formability of two and three-layer composite sheets manufactured by roll bonding, *Materials and Design*, Vol. 44, No. 1, pp. 392-396, 2013 .
[6] H. D. Manesh, H. S. Shahabi, Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 476, No. 1, pp. 292-299, 2009 .
[7] H. Akramifard, H. Mirzadeh, M. Parsa, Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 613, No. 1, pp. 232-239, 2014 .
[8] H. Arabi, S. Seyedein, A. Mehryab, B. Tolaminejad, Mathematical modeling and simulation of the interface region of a tri-layer composite material, brass-steel-brass, produced by cold rolling, International Journal of Minerals, *Metallurgy and Materials*, Vol. 16, No. 2, pp. 189-196, 2009 .
[9] Y. Sun, N. Xu, H. Fujii, The microstructure and mechanical properties of friction stir welded Cu–30Zn brass alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 589, No. 1, pp. 228-234, 2014 .
[10] P. Wakefield, M. Hatherly, Microstructure and texture of cold-rolled Cu-10Zn brass, *Metal Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 109-115, 1981 .
[11] I. Tamura, H. Sekine, T. Tanaka, *Thermomechanical Processing of High-Strength Low-Alloy Steels*, pp. 56-60, 2013.
[12] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, H. Edris, Effect of SiC nanoparticles on bond strength of cold roll bonded IF steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 11, pp. 3348-3356, 2013.
[13] S. J. Jahromi, A. Nazarboland, E. Mansouri, S. Abbasi, Investigation of formability of low carbon steel sheets by forming limit diagrams, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 377-385, 2006.
[14] A. A. Salem, S. R. Kalidindi, R. D. Doherty, Strain hardening of titanium: role of deformation twinning, *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 14, pp. 4225-4237, 2003.
[15] M. Safaeirad, M. Toroghinejad, F. Ashrafizadeh, Effect of microstructure and texture on formability and mechanical properties of hot-dip galvanized steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1, pp. 205-212, 2008 .
[16] J. Y. Jin, S. I. Hong, Effect of heat treatment on tensile deformation characteristics and properties of Al3003/STS439 clad composite, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 596, No. 1, pp. 1-8, 2014 .
[17] W. Bo, X. H. Chen, F.S. Pan, J. J. Mao, F. Yong, Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 8, pp. 2481-2489, 2015 .
[18] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, H. Edris, Comparison of microparticles and nanoparticles effects on the bonding of roll bonded IF steel, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 67, No. 5, pp. 659-665, 2014 .
[19] W. Liu, C.S. Man, D. Raabe, Effect of strain hardening on texture development in cold rolled Al–Mg alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 4, pp. 1249-1254, 2010 .
[20] K. Hajizadeh, M. Tajally, E. Emadoddin, E. Borhani, Study of texture, anisotropy and formability of cartridge brass sheets, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 588, No. 1, pp. 690-696, 2014 .
[21] R. Shabadi, S. Suwas, S. Kumar, H. Roven, E. Dwarkadasa, Texture and formability studies on AA7020 Al alloy sheets, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, No. 1, pp. 439-445, 2012 .
[22] C. Xie, E. Nakamachi, The effect of crystallographic textures on the formability of high-strength steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, No. 1, pp. 104-111, 2002 .
[23] H. Zhang, G. Huang, D. Kong, G. Sang, B. Song, Influence of initial texture on formability of AZ31B magnesium alloy sheets at different temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 10, pp. 1575-1580, 2011 .
[24] Y. Chino, K. Sassa, M. Mabuchi, Texture and stretch formability of a rolled Mg–Zn alloy containing dilute content of Y, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 513, No. 1, pp. 394-400, 2009 .
[25] K. A. Al-Ghamdi, G. Hussain, On the comparison of formability of roll-bonded steel-Cu composite sheet metal in incremental forming and stamping processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No. 1-4, pp. 267-278, 2016 .
[26] E. Nakamachi, C. Xie, M. Harimoto, Drawability assessment of BCC steel sheet by using elastic/crystalline viscoplastic finite element analyses, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 3, pp. 631-652, 2001.