علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، پاییز و زمستان 1396، صفحه 78-68

بررسی خواص مکانیکی جوش سرد برنج و فولاد IF تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

علیرضا باقری ، محمد رضا طرقی نژاد ، ابوذر طاهری زاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: 1395/05/17 ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: 1396/01/16)

چکیده

نورد سرد پیوندی یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که پیوند در اثر تغییر شکل پلاستیک مواد ایجاد می شود. این فرایند برای گستره ای از مواد قابل استفاده است. علاوه بر این، برای ایجاد اتصال بین فلزاتی که با روش های مرسوم جوشکاری نمی توانند پیوند ایجاد کنند، از فرایند نورد سرد پیوندی استفاده می شود. در این پژوهش، جوش سرد برنج و فولاد IF مورد مطالعه قرار گرفت. تاثیر پارامترهای فرایند نظیر کاهش ضخامت، آنیل قبل از نورد و زبری سطح بر خواص مکانیکی ورق های جوش داده شده مورد بررسی قرار گرفت. از آزمون های لایه کنی و سنبه برشی برای بررسی خواص مکانیکی نمونه های جوش استفاده شد. مشاهده شد که استحکام پیوند و استحکام برشی با افزایش میزان کاهش ضخامت و زبری سطح، افزایش می یابند. همچنین آنیل قبل از فرایند نورد سرد موجب افزایش استحکام پیوند و کاهش استحکام برشی می گردد. در پایان برای ارزیابی سطوح شکست نمونه های آزمون های لایه کنی و سنبه برشی از میکروسکوپ نوری(OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) استفاده شد.

کلمات کلیدی: نورد سرد پیوندی، جوشکاری حالت جامد، خواص مکانیکی، استحکام پیوند، استحکام برشی.

Investigation of the mechanical properties of cold roll welded Brass and IF steelproduced by cold roll bonding process

A. Bagheri, M. R. Toroghinejad, A. Taherizadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 7 August 2016 ; Accepted 5 April 2016)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: alireza.bagheri@ma.iut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

Abstract
Cold roll bonding (CRB) is a solid state welding process, where the bonding is established by compressive plastic deformation of the metals. This process is applicable for a large number of materials. In addition, materials that cannot be bonded by traditional fusion-based processesmight be bonded by CRB process. In this research, cold roll welding of brass and IF steel was studied .The effects of process parameters such as reduction of thickness, pre-rolling annealing conditions and surface roughness on the mechanical propertiesof welded strips were investigated. The peeling and shear punch testswere used to investigate the mechanical properties of welded samples .It was observed that the bond and shear strengths were enhanced by increasing the reduction and surface roughness. Also, annealing treatment before the CRB process increased the bond strength and decreased the shear strength. Finally, optical and scanning electron microscopes were used to evaluate the fracture surfaces of the tensile and peelingtest specimens.

Keywords: Cold roll bonding,Solid state welding,mechanical properties,Bond strength, Shearstrength.

1- مقدمه

کامپوزیت های لایه ای به دلیل تافنس بالا، مقاومت به خوردگی و سایش مناسب، خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی مطلوب مورد توجه قرار گرفته اند[1]. روش های گوناگونی نظیر نظیر آبکاری[1][2]، پراکنش مغناطیسی[2][3]، رسوب فیزیکی بخار[3][4]، جوشکاری انفجاری[4][5]و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[5][6] برای تولید کامپوزیت های لایه ای مورد استفاده قرار می گیرد. نیاز به تجهیزات پیچیده و گران قیمت و همچنین محدودیت در ابعاد و شکل نمونه مانعی برای تجاری و صنعتی سازی این فرایند هاست. ثابت شده است که فرایند نورد سرد پیوندی[6] یکی از متداول ترین و مقرون به صرفه ترین روش های تولبد کامپوزیت های لایه ای است[7]. اخیرا استفاده از این روش به دلیل تجهیزات ساده و ارزان و قابلیت تولید پیوسته کامپوزیت ها با ابعاد و شکل مختلف، به سرعت رشد و توسعه پیدا کرده است. فرایند نورد سرد پیوندی یک روش جوشکاری حالت جامد است که پیوند در نتیجه تغییر شکل پلاستیک ایجاد می شود.این فرایند برای اتصال بین فلزات مشابه و غیر مشابه در دمای محیط، که امکان اتصال آنها با روش های متداول جوشکاری نیست، مورد استفاده قرار گرفته است[8].مهمترین هدف در طی فرایند نورد سرد پیوندی ایجاد استحکام پیوند مناسب بین لایه هاست. دسترسی به خواص مکانیکی مطلوب از دیگر ضروریات در این فرایند است. استحکام پیوند بیشترین تاثیر را بر خواص مکانیکی کامپوزیت های لایه ای دارد[9]. پارمترهای مختلفی نظیر میزان کاهش ضخامت، ضخامت اولیه ورق، اثر آنیل قبل و بعد از فرایند، سرعت نورد، جهت نورد، زبری سطح، ضریب اصطکاک بین ورق ها و غلطک، حضور ذرات ثانویه و حضور پوشش در بین ورق ها بر استحکام پیوند بین لایه ها تاثیر گذارند. این پارامترها خواص مکانیکی کامپوزیت را تحت شعاع قرار می دهد [10].

فولاد از استحکام کافی و خواص شکل پذیری مناسبی برخوردار است. آلیاژ برنج نیز هدایت حرارتی و الکتریکی بسیار بالایی و مقاومت به خوردگی مطلوبی دارند. با در نظر گرفتن این واقعیت که مقاومت الکتریکی یک رسانا از جمع مقاومت الکتریکی هر کدام از اجزا بدست می آید، می توان انتظار داشت ساخت کامپوزیت برنج- فولاد به میزان بسیار می تواند در اجزای الکتریکی کاربرد پیدا کند[11]. اما بر خلاف فولاد ، جوشکاری ذوبی برنج بسیار سخت می باشد. مشکل اصلی جوشکاری ذوبی برنج، بخار شدن روی در حین فرایند جوشکاری شده و بعد از آن، آلیاژ دچار تخلخل می شود. همچنین کاهش مقدار روی به دلیل بخار شدن، باعث تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی برنج می شود[12]. لذا برای اتصال برنج به فولاد باید از روش های دیگر جوشکاری استفاده نمود. روش های گوناگونی برای اتصال برنج به فولاد مورد بررسی قرار گرفته است. از نمونه مطالعات انجام شده می توان به پژوهش انجام شده توسط موسوی و همکارانش [13] اشاره کرد که کامپوزیت دولایه برنج- فولاد St14 را به روش جوشکاری انفجاری تولید کردند. همچنین فتحی و همکارانش [14]

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

کامپوزیت سه لایه برنج- فولاد St14 – برنج را به روش جوشکاری انفجاری تولید کردند. از معایب روش جوشکاری انفجاری می توان به تغییر حالت فصل مشترک از صاف به موجی اشاره کرد. همچنین در اکثر مواقع اتصال همراه با افزایش ناگهانی سختی در فصل مشترک، به دلیل نیروی شدید انفجار بوده است که موجب کارسختی شدید و بانرخ کرنش بالا در سطوح تماس می شود. کیمورا و همکارانش [15] تاثیر شرایط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر استحکام جوش برنج – فولاد کم کربن بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای ایجاد اتصال موثر 100 درصدی وعدم ایجاد شکست در فلز پایه برنج بدون وجود هیچ نوع ترک در فصل مشترک، باید فشار اصطکاکی بالا در مدت زمان طولانی تر اعمال کرد. این امر باعث افزایش هزینه و حدر رفت زمان می گردد.

برنج CuZn10 با ریزساختار تک فازα دارای شکل پذیری مطلوب همراه با استحکام کافی است[16].فولادعاری از عناصر بین نشین[7](IF) با ریزساختارتکفاز فریتی،از قابلیت شکل پذیری بسیار بالایی برخوردارمی باشد[17]. کامپوزیت لایه ای شامل برنج CuZn10 و فولاد IF از شکل پذیری بالا و هدایت الکتریکی مطلوب به همراه خوردگی مناسب برخوردار است. لذا هدف از انجام این پژوهش ایجاد جوش سرد بین برنج و فولاد IF به روش نورد سرد پیوندی و بررسی خواص مکانیکی آن می باشد.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- مواد اولیه

دراین پژوهش ورق های برنج Cu-10wt%Zn با ابعاد 80×30×1.13 میلیمتر و ورق های فولاد IF با ابعاد80×30×0.7 میلیمترموازی با جهت نورد بریده شدند و مورد استفاده قرار گرفتند.جدول 1 ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده را نشان می دهد.

2-2- فرایند نورد سرد

قبل از فرایند نورد سرد باید آلودگی های سطحی نظیر چربی ها و اکسیدها از سطوح به طور کامل پاک شوند. به همین منظور ابتدا سطوح فولاد و برنج تحت استون شویی قرار گرفتند، سپس توسط برس فولادی مجزا برسکاری شدند و سمت برسکاری شده روی یکدیگر قرار گرفتند. برای جلوگیری از لغزش ورق ها بر روی هم در حین فرایند نورد، چهار گوشه ی ورق ها توسط سیم فولادی ثابت شدند. فرایند نورد سرد به وسیله دستگاه نورد با ظرفیت 40 تن و قطر غلتک230 mm انجام شد.سه لایه فلزی شامل، یک لایه فولاد در وسط و دو لایه برنج در اطراف تحت فرایند نورد قرار گرفتند. شمای کلی فرایند نورد سرد در شکل 1 آورده شده است. برای نورد این نمونه ها کاهش ضخامت 55 تا 75 درصد اعمال شد. برای آنیل قبل از فرایند نورد سرد، فولاد به مدت60دقیقه در دمای^{o}C 650 و برنج به مدت 90 دقیقه در دمای ^{o}C600 آنیل شد.

2-3- آزمون لایه کنی

استحکام پیوند ورق های جوش داده شده از طریق نورد سرد با استفاده از آزمون لایه کنی بر طبق استاندارد ASTM-D1876-01 محاسبه گردید. آزمون لایه کنی با استفاده از دستگاه تست کشش Hounsfield H25KS با بار اعمالی 25 kg و سرعت 20 m/min انجام شد. همچنین برای محاسبه میانگین استحکام پیوند از رابطه ی 1 استفاده شد.

$$\text{میانگین استحکام پیوند} = \frac{\text{میانگین نیروی لایه کنی}(N)}{\text{پیوندعرض}(mm)} \quad (1)$$

2-4- آزمون سنبه برشی

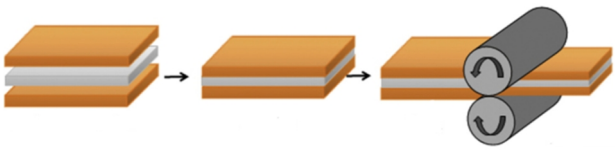
استحکام برشی نمونه های جوش با استفاده از آزمون سنبه برشی بررسی گردید. آزمون سنبه برشی بر اساس استاندارد ASTM-D732-02، به وسیله دستگاه Hounsfield H25KS با بار اعمالی25 kg و سرعت 1 mm /min انجام شد. همچنین برای محاسبه استحکام برشی از رابطه ی 2 استفاده شد. در این رابطهτاستحکام برشی، Pبار اعمالی ،r شعاع اثر سنبه و t ضخامت ورق می باشد.

$$\tau = \frac{P}{2\pi r.t} \quad (2)$$

پس از آزمون لایه کنی و سنبه برشی، سطـــح شکست نمونه ها

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی PHILIPS XL30 و میکروسکوپ نوری بررسی شد.



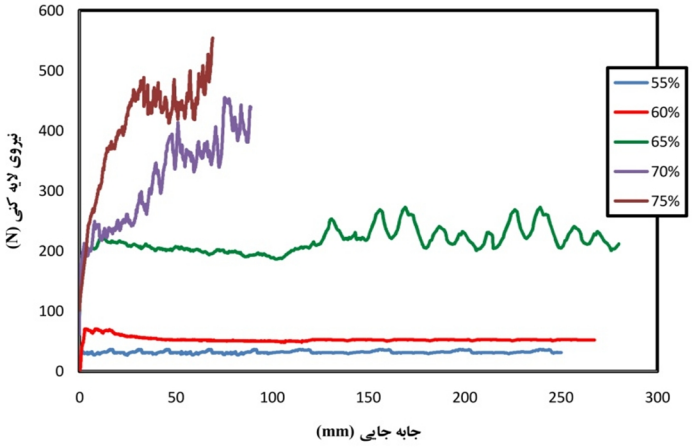
شکل1- شمای کلی فرایند نورد سرد پیوندی برای سه لایه، شامل دو لایه برنج در اطراف و یک لایه فولاد در وسط.

3- نتایج و بحث

3-1- تاثیر میزان تغییر شکل پلاستیک بر استحکام پیوند

شکل2 تاثیر میزان تغییر شکل پلاستیک را بر استحکام پیوند بین ورق های برنج و فولاد جوش داده شده از طریق نورد سرد نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش میزان کاهش ضخامت، استحکام پیوند افزایش یافته و اتصال سرد بهتری بین لایه ها ایجاد می گردد.همچنین شکل 2 نشان می دهد میزان کاهش ضخامت آستانه 65 درصد بوده و در میزان تغییر شکل کمتر از آن پیوند ایجاد نمی شود. در میزان کاهش ضخامت بیشتر از 65 درصد استحکام پیوند بشدت افزایش یافته و این روند تا حدی ادامه می یابد که در کاهش ضخات 70 درصد استحکام پیوند بین لایه ها از استحکام کششی ورق ها بیشتر شده و ورق ها در حین آزمون لایه کنی پارهمی شوند.در اثر افزایش میزان نورد و یا به عبارتی افزایش تغییر شکل پلاستیک میزان گسترش سطح افزایش یافته و در نتیجه میزان ترک های سطحی بوجود آمده نیز افزایش می یابند [18]. این ترک ها محل های مناسبی برای خروج فلز دست نخورده می باشند و نهایتا ایجاد اتصال در حالت جامد را فراهم می کند که افزایش استحکام پیوند را منجر می شود [7].

در شکل 3 (الف تا د) ریزساختار اولیه برنج و فولاد و همچنین نمونه جوش،بعد از فرایند نورد در کاهش ضخامت 65 درصد دیده می شود. همان طور که در شکل 2 (الف و ب) مشاهده می شود دانه های برنج و فولادبه صورت هم محور و یکنواخت، بدون هیچ گونه اثر کارسختی می باشند. در شکل 2 (ج و د) نیز ایجاد اتصال کامل و یکنواخت به وضوح قابل مشاهده است .



شکل2-اثر میزان تغییر شکل پلاستیک بر استحکام پیوند بین ورق های برنج و فولاد جوش داده شده.

همچنین دانه ها به صورت ریز و موازی در جهت نورد کشیده شده که این امر ناشی از تغییر شکل پلاستیک و اعمال نیرو نورد برای ایجاد جوش سرد بود است.

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح شکست فولاد را بعد از آزمون لایه کنی نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزایش میزان کاهش ضخامت از 65 به 70 درصد میزان و ضخامت ترک ها سطحی عمود بر جهت نورد افزایش یافته و سطوح بیشتری با هم پیوند ایجاد کرده اند.در حقیقت، با افزایش فشار نورد، دو لایه‌ی سطحی اکسیدی مجددا تشکیل شده پس از آماده سازی، شکسته شده و ترک‌هایی در آن ایجاد می‌شود. سپس فلز تازه و بکری که زیر سطح قرار دارد از میان این ترک‌ها به بیرون اکسترود شده و در اثر جوش سرد بین آن‌ها پیوندی قوی تشکیل می‌گردد. مناطق پیوند نیافته‌ی لایه‌ی سطحی شکننده به صورت جزیره‌های کوچک ایزوله‌ای محبوس شدند [19]. همچنین شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست برنج را بعد از آزمون لایه کنی در نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود که با افزایش میزان کاهش ضخامت میزان و شدت ترک ها در جهت عمود نورد بیشتر شده است. این امر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

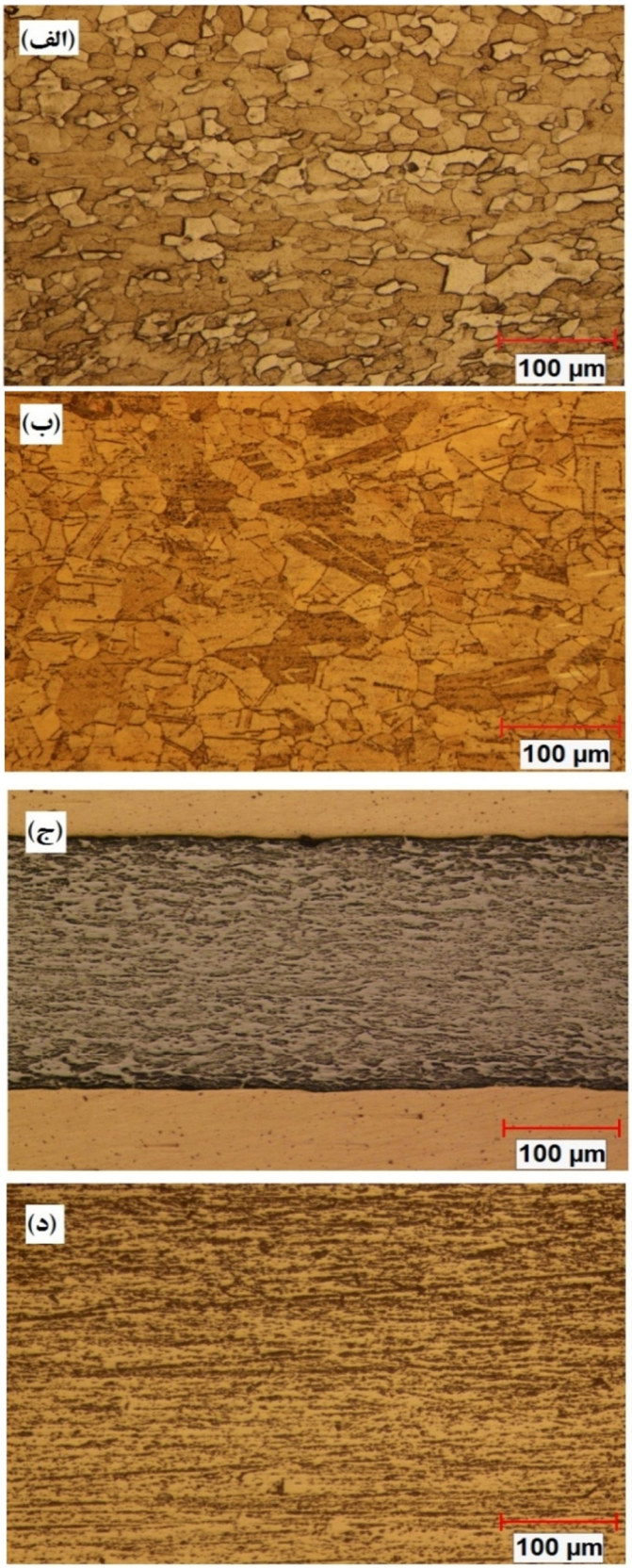
نشـــــان دهنده افزایش اکسترود شدن فلز بکر و دست نخورده از میان ترک ها می باشد [20].

3-2- تاثیر آنیل قبل از نورد بر استحکام پیوند

شکل 6 تاثیر آنیل قبل از فرایند نوردسرد بر استحکام پیوند لایه های فولاد و برنج جوش داده شده را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود که آنیل قبل از فرایند نورد موجب افزایش استحکام پیوند، بهبود اتصال جوش سرد و همچنین کاهش میزان تغییر شکل آستانه می گردد.آنیل قبل از فرایند نورد سرد پیوندی موجب تسهیل شکستن لایه های سطحی و افزایش شکل پذیری فلز دست نخورده می شود که این دو عامل باعث بهبود پیوند ایجاد شده می گردد[21]. علاوه بر آن چقرمگی پیوند نیز افزایش می یابد که خود موجب می شود در آزمون لایه کنی نیروی بیشتری برای جدا کردن اتصال مورد نیاز باشد[22]. از طرفی برای ایجاد پیوند نیاز به غلبه بر سد انرژی پیوند است که در اثر عملیات آنیل قبل از فرایند، اتم های بیشتری انرژی مورد نیاز را کسب کرده و نقش تغییر شکل در غلبه بر سد انرژی کاهش می یابد که در نتیجه میزان تغییر شکل آستانه کاهش یافته و در کاهش ضخامت معین میزان چسبندگی افزایش می یابد[23].

3-3- تاثیر زبری سطح بر استحکام پیوند

برای بررسی تاثیر زبری سطح ورق ها بر استحکام پیوند بین لایه های کامپوزیت، از 4 مدل برس سیمی فلزی دوار با مشخصات فنی مطابق جدول 2 استفاده گردید. همان طور که مشاهده می شود قبل از فرایند برس کاری، زبری سطوح برنج و فولاد IF در امتداد جهت نورد بترتیب برابر0/4 و0/5µm بوده است. با کاهش قطر برس، میزان سایش و اصطکاک بین برس و ورق ها بیشتر شده که منجر به افزایش زبری و کار سختی سطوح می گردد[24].با توجه به سختی اولیه مشابه دو فلز (حدود 80 ویکرز)، انتظار می رفت که میزان زبری ایجاد شده روی دو سطح تقریبا برابر باشد. ولی به خاطر مکانیزم سایش متفاوت در فلز ها با ساختار کریستالی غیر مشابه، زبری



شکل3 (الف و ب) -ریزساختار اولیه فولاد و برنج، (ج ود)ریزساختار نمونه جوش در کاهش ضخامت 65.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

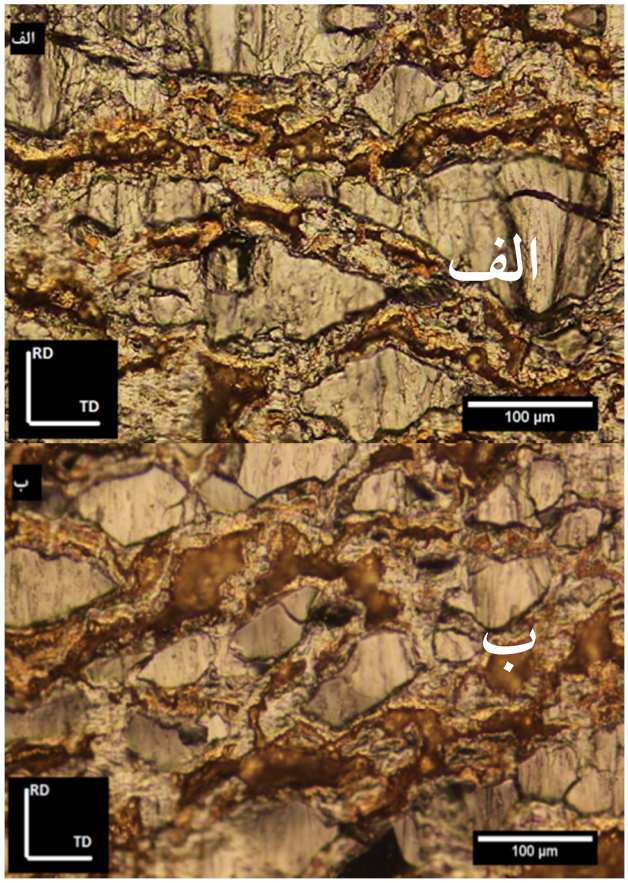
سطوح با یکدیگر متفاوت است.در حین ایجاد زبری با یک برس ثابت، بر روی سطح فولاد با ساختار BCC، سایش خراشان اتفاق می افتد. ولی در سطح برنج با ساختار FCC، مکانیزم غالب سایش از نوع چسبان بوده و مقداری از سطح برنج به برس می چسبد. در نتیجه زبری کمتری نسبت به فولاد روی سطح ایجاد می گردد [25]. شکل 7 تاثیر زبری سطح بر استحکام پیوند نمونه های جوش فولاد و برنج را در میزان تغییر شکل پلاستیک ثابت (65%) نشان می دهد.

همان طور که مشاهده می شود با افزایش زبری سطح لایه ها ناشی از کاهش قطر برس، استحکام پیوند افزایش یافته و از 5/5 به 4/8N/m رسیده است. افزایش میزان کارسختی ناشی از افزایش زبری سطح موجب بیشتر شدن میزان تردی سطح می شود.بر اساس تئوری فیلم افزایش سختی لایه سطحی موجب تسهیل در ایجاد ترک در لایه سطحی کار سخت شده حین فرایند نورد سرد پیوندی می شود. این امر موجب افزایش عرض ترک ها روی لایه سطحی می شود. در نتیجه فلز بکر و دست نخورده افزایش یافته بیشتری از میان ترک ها اکسترو شده و با سطح مقابل پیوند ایجاد می کندکه موجب بهبود استحکام پیوند بهبود می شود[26].

افزایش زبری توسط برس کاری نه تنها کیفیت پیوند را افزایش داده، بلکه موجب کاهش فشار مورد نیاز برای تشکیل پیوند نیز می شود[27]. فشار تماسی میانگین از رابطه‌ی زیر محاسبه می شود که در آن F، W و L به ترتیب نیروی نورد، پهنای ورق و سطح تماس ورق ها می‌باشند:

$$P = \frac{F}{WL} \quad (3)$$

در کاهش ضخامت ثابت، با افزایش زبری ، سطح تماس دو ورق کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه‌ی بالا، کاهش سطح تماس ورق ها منجر به افزایش فشار تماسی میانگین و افزایش تنش در سطوح تماس می‌شود. در نتیجه میزان فلز بیشتری می توانند با هم پیوند برقرار کنند و استحکام پیوند افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش زبری سطح، فشار لازم برای دست‌یابی به یک کاهش ضخامت ثابت کاهش می‌شود[21].



شکل 4. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح شکست فولاد الف) 65 درصد کاهش و ب) 70 درصد کاهش ضخامت.

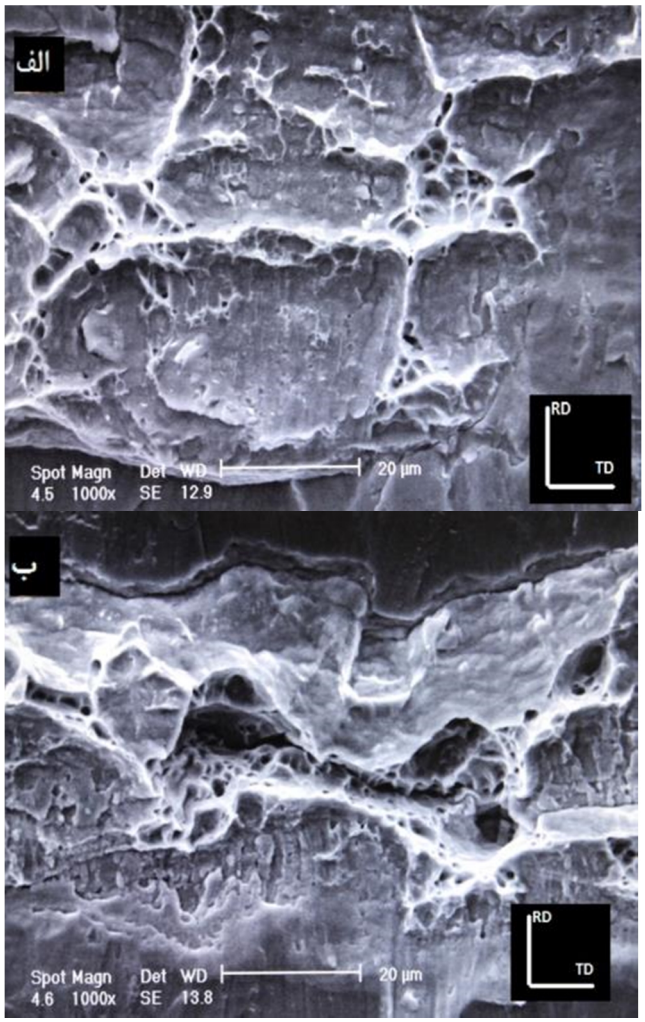
3-4- تاثیر تغییر شکل پلاستیک و آنیل قبل از نورد بر استحکام برشی

شکل8 تاثیر میزان تغییر شکل پلاستیک و آنیل قبل از فرایند نورد سرد را بر استحکام برشی نمونه های جوش فولاد و برنج‌نشان می دهد.

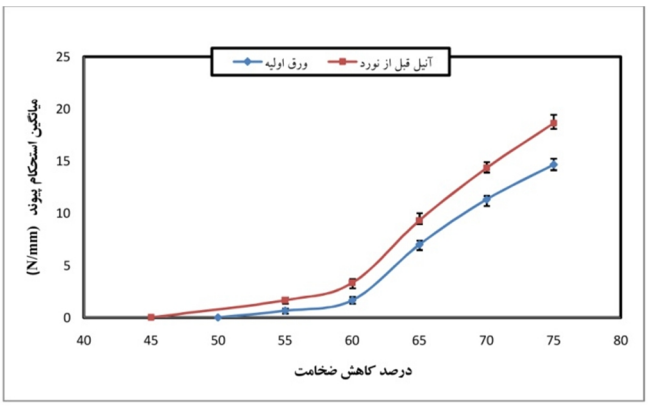
با توجه به شکل مشاهده می شود که افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش و آنیل قبل نورد باعث کاهش استحکام برشی نمونه جوش می گردد. افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش کرنش سختی و چگالی نابجایی ها در لایه ها شده، و از طرفی باعث کار سختی فصل مشترک و افزایش استحکام آن می گردد. این دو عامل باعث افزایش استحکام برشیلایه های می گردد [28]. آنیل قبل از نورد باعث کاهش تنش باقیمانده و افزایش شکل پذیری ورق ها نسبت به حالت اولیه می شود و در حین نورد ورق ها تغییر شکل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

یکنواخت تری می دهند و به میزان کمتری کارسخت می شوند در نتیجه استحکام برشی آن ها نسبت به حالت اولیه مقداری کاهش می یابد [29].

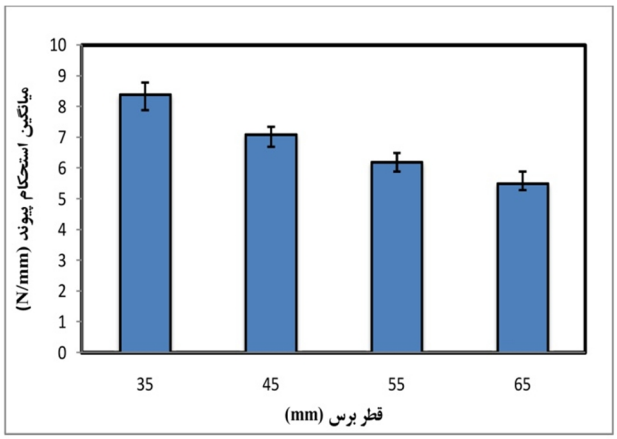


شکل 5. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست برنج الف) 65 درصد و ب)70 درصد کاهش ضخامت

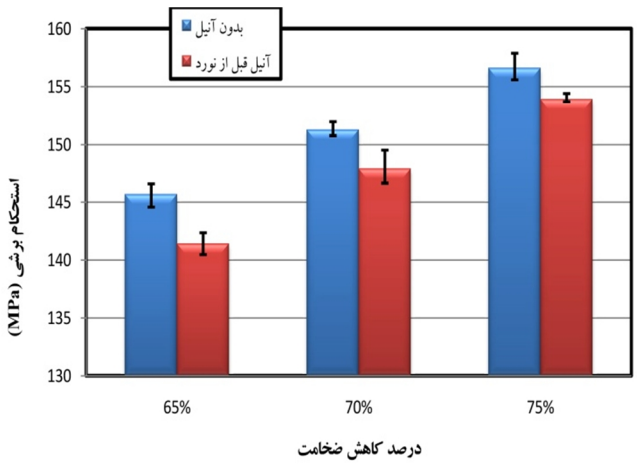


شکل 6 .تاثیر آنیل قبل از فرایند نورد سرد بر استحکام پیوند نمونه های جوش.

شکل 9(الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست نمونه های پانچ شده در آزمون سنبه برشی را نشان می دهد. در ابتدا حین اعمال نیرو، برنج به دلیل شکل پذیری بالا به خوبی بر روی سطح نمونه پانچ شده تغییر شکل داده و تا نزدیکی فصل مشترک کشیده شده است. در فصل مشترک لایه ها به دلیل کارسختی بالاتر، شکست نرم برشی ایجاد شده و دیمپل های برشی کشیده شده بسیار دیده می شود. مشخصه‌ی شکست نرم برشی، دیمپل‌های برشی کشیده شده‌ی کوچک و کم‌عمقی است که در امتداد جهت برش قرار گرفته‌اند (شکل 9-ب).



شکل 7. تاثیر زبری سطح بر استحکام پیوند نمونه های جوش فولاد و برنج در میزان تغییر شکل پلاستیک ثابت (65%).



شکل 8.تاثیر میزان تغییر شکل پلاستیک و انیل قبل از فرایند نورد سرد بر استحکام برشی نمونه های جوش.

همچنین در شکل 9 (ج) مشاهده می شود که با افزایش تغییر شکل پلاستیک و کارسختی ناشی از آن ، میزان شکست نرم در

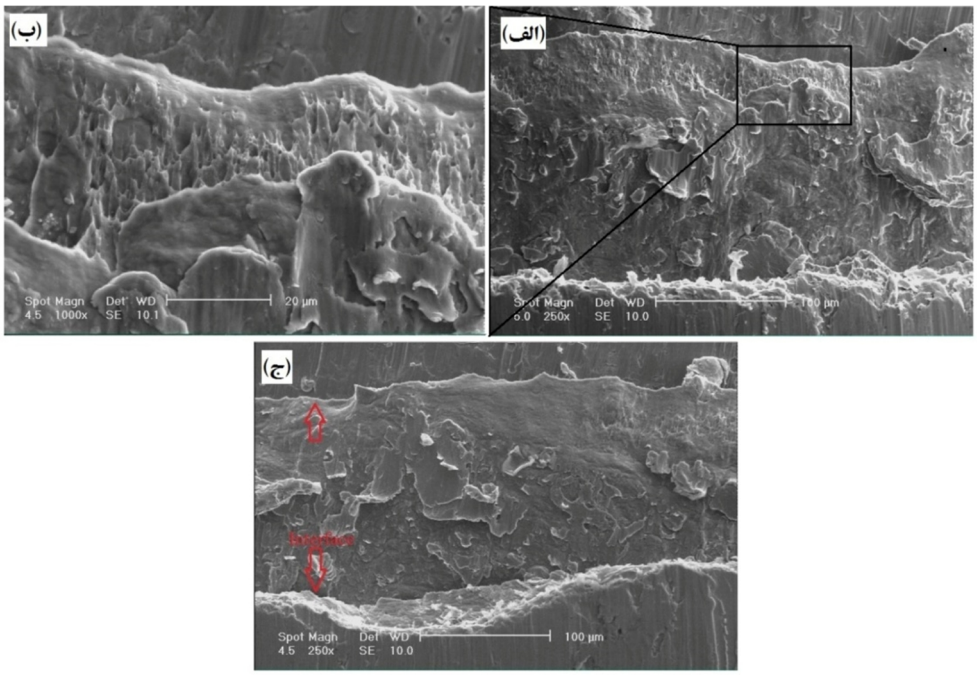
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد و برنج.

ماده	Fe	C	Cu	Zn	Si	Ni	Mn	Ti	N	Al	P
فولاد IF	۹۹/۹۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱	–	۰/۰۱	۰/۰۱۸	۰/۱۴	۰/۰۵۵	۰/۰۰۴	–	–
برنج	۰/۰۱۵	–	۸۹/۹۱۵	۱۰/۰۵۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	–	–	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲

جدول2- تاثیر قطر برس بر زبری سطوح فولاد و برنج.

قطر برس(mm)	زبری سطح برنج(µm)	زبری سطح فولاد(µm)
۳۵	۳/۲	۳/۶
۴۵	۲/۷	۳/۲
۵۵	۱/۹	۲/۷
۶۵	۱/۱	۲/۰۵



شکل 9- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست آزمون سنبه برشی در کاهش ضخامت های (الف)،(ب) 65 درصدو ج)70 درصد.

فصل مشترک کاهش یافته و اندازه و عمق دیمپل‌ها کم تر شده است. این امر به علت افزایش تردی فصل مشترک و بیشتر شدن میزان کرنش‌سختی و استحکام برشی نمونه‌ها می‌باشد. افزایش استحکام برشی در نتیجه‌ی افزایش کارسختی‌می باشد و لـــذا کاهش انعطاف‌پذیری در طول فرایند نورد سرد پیوندی به کاهش شکست نرم منجر می شود[30].

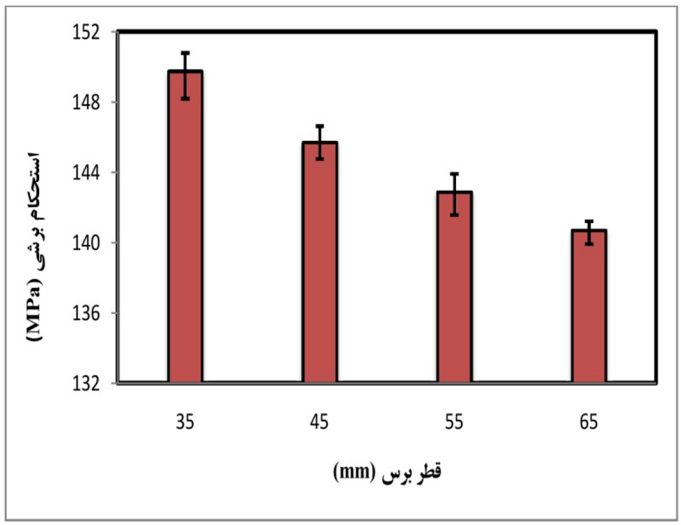
3-5- تاثیر زبری سطح بر استحکام برشی

شکل 10تاثیر افزایش میزان زبری سطوح برنج و فـــولاد را بر استحکام برشی نمونه جوش در کاهش ضخامت یکسان نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زبری سطوح ناشی از کاهش قطر برس، استحکام برشی نمونه جوش افزایش یافته است.

افزایش میزان زبری باعث ببیشتر شدن کارسختی سطح شده که موجب افزایش میزان سختی فصل مشترک می شود. همچنین با افزایش میزان زبری، عرض ترک ها روی لایه سطحی بیشتر شده و فلز دست نخورده ی بیشتری از میان ترک ها اکسترود می شود. اکسترود شدن بیشتر فلز باعث تغییر شکل بیشتر آن و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

افزایش کارسختی در حین ایجاد پیوند می شود. این دو عامل باعث افزایش میزان کارسختی در کامپوزیت، بخصوص در فصل مشترک ها شده و درنتیجه استحکام برشی افزایش می یابد[31]. از طرفی افزایش زبری باعث کاهش سطح تماس دو سطح می شود. مطابق فرمول 3 کاهش سطح تماس باعث افزایش میزان فشار اعمالی بر فصل مشترک و بیشتر شدن تمرکز تنش در آن شده، که منجر به افزایش میزان کارسختی و استحکام برشی فصل مشترک می شود. با توجه ضخامت حدود یک میلی متر نمونه جوش و وجود دو فصل مشترک در آن، افزایش میزان کارسختی در فصل مشترک و اطراف آن تاثیر بسزایی بر خواص مکانیکی کل کامپوزیت می گذارد[32].



شکل10-تاثیر میزان زبری سطح بر استحکام برشی نمونه های جوش فولاد و برنج .

4- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر میزان کاهش ضخامت، آنیل قبل از فرایند نورد و زبری سطح براستحکام پیوند و استحکام برشی جوش برنج و فولاد IF پرداخته شد. این یافته ها را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

1- با افزایش میزان تغییر شکل پلاستی ک میزان گسترش بیشتر شده و در نتیجه میزان ترک های سطحی بوجود آمده نیز افزایش می یابند. این ترک ها محل های مناسبی برای خروج فلز دست نخورده می باشند و نهایتا ایجاد اتصال در حالت جامد را فراهم می کند که افزایش استحکام پیوند را منجر می شود.

2- آنیل قبل از فرایند نورد موجب افزایش استحکام پیوند و بهبود اتصال جوش سرد شده و همچنین باعث کاهش میزان تغییر شکل آستانه می گردد.

3- افزایش زبری سطح نه تنها کیفیت پیوند را افزایش داده، بلکه موجب کاهش فشار مورد نیاز برای تشکیل پیوند می شود. این امر موجب بهبود اتصال جوش می گردد.

4- افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش کرنش سختی و چگالی نابجایی هادر لایه ها شده، و از طرفی باعث کارسختی فصل مشترک و افزایش استحکام آن می گردد. این دو عامل باعث افزایش استحکام برشی لایه های می گردد.

5- آنیل قبل از نورد باعث کاهش تنش باقیمانده و افزایش شکل پذیری ورق ها نسبت به حالت اولیه می شود. در نتیجه در حین نورد ورق ها تغییر شکل یکنواخت تری می دهند و به میزان کمتری کارسخت می شوند. این امر موجب کاهش استحکام برشی آن ها نسبت به حالت او لیه می گردد.

6- افزایش میزان زبری باعث ببیشتر شدن کارسختی سطح شده که موجب افزایش میزان سختی فصل مشترک می شود. همچنین با افزایش میزان زبری، فلز دست نخورده ی بیشتری از میان ترک ها اکسترود می شود. اکسترود شدن بیشتر فلز باعث تغییر شکل بیشتر آن و افزایش کارسختی در حین ایجاد پیوند می شود. این دو عامل باعث افزایش استحکام برشی نمونه جوش می گردد.

واژه نامه

1-Electroplating
2-Magnetic sputtering
3-Physical vapor deposition
4-Explosively welded
5- Friction stir welding
6-Cold roll bonding (CRB)
7-Interstitial free (IF) steel

منابع

1-Jin J.Y., Hong S.I., "Effect of heat treatment on tensile

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

deformation characteristics and properties of al3003/sts439 clad composite", Materials Science and Engineering: A, Vol. 596, pp. 1-8, 2014.
2-Renevier N., Fox V., Teer D., Hampshire J., "Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited mos 2/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating", Surface and Coatings Technology, Vol. 127, pp. 24-37, 2000.
3- Yang H., Guo X., Chen X., Birbilis N., "A homogenisation pre-treatment for adherent and corrosion-resistant ni electroplated coatings on mg-alloy az91d", Corrosion Science, Vol. 79, pp. 41-49, 2014.
4-Gulenc B., "Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method", Materials & Design, Vol. 29, pp. 275-278, 2008.
5- An K., Ravichandran K.S., Dutton R.E., Semiatin S., "Microstructure, texture, and thermal conductivity of single-layer and multilayer thermal barrier coatings of y2o3-stabilized zro2 and al2o3 made by physical vapor deposition", Journal of the American Ceramic Society, Vol. 82, pp. 399-406, 1999.
6-Esmaeili A., Givi M.B., Rajani H.Z., "A metallurgical and mechanical study on dissimilar friction stir welding of aluminum 1050 to brass (cuzn30)", Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, pp. 7093-7102, 2011.
7-Jamaati R., Toroghinejad M., "Cold roll bonding bond strengths: Review", Materials science and technology, Vol. 27, pp. 1101-1108, 2011.
8- Mohamed H.A., Washburn J., "Mechanism of solid state pressure welding", Welding Journal, pp. 302-310, 1975
9- Akramifard H., Mirzadeh H., Parsa M., "Cladding of aluminum on aisi 304l stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties", Materials Science and Engineering: A, Vol. 613, pp. 232-239, 2014.
10- Li L., Nagai K., Yin F., "Progress in cold roll bonding of metals", Science and Technology of Advanced Materials, pp. 2008.
11- Arabi H., Seyedein S.H., Mehryab A., Tolaminejad B., "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, pp. 189-196, 2009.
12- Meran C., "The joint properties of brass plates by friction stir welding", Materials & Design, Vol. 27, pp. 719-726, 2006.
۱۳- موسوی، س.، مهریاب، ع.، فتحی، الف.، " بررسی تاثیر میزان ماده منفجره در خواص رو کشکاری انفجاری اتصال ورق های برنج -Ms90 فولاد"St14 ، نهمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی ، تهران، 1387.
14- فتحی، الف.، موسوی، س.، مهریاب، ع.، "بررسی تاثیر فاصله توقف در هندسه و ریزساختار فصل مشترک جوشکاری انفجاری کامپوزیت سه لایه ورق های برنج -Ms90 فولاد -St14برنج"Ms90 ، همایش ملی مواد نو، تهران، 1387.
15- Kimura M., Kasuya K., Kusaka M., Kaizu K., Fuji A., "Effect of friction welding condition on joining phenomena and joint strength of friction welded joint between brass and low carbon steel", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, pp. 404-412, 2009.
16-Ghosh P., Bhattacharya B., Ray R., "Comparative study of precipitation behavior and texture formation in cold rolled-batch annealed and cold rolled-continuous annealed interstitial free high strength steels", Scripta Materialia, Vol. 56, pp. 657-660, 2007.
17-Wakefield P., Hatherly M., "Microstructure and texture of cold-rolled cu-10zn brass", Metal Science, Vol. 15, pp. 109-115, 1981.
18- Jamaati R., Toroghinejad M.R., "Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 2320-2326, 2010
19- Soltania M.A., Jamaatib R., Toroghinejad M.R., "The influence of TiO2 nano-particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips", Materials Science and Engineering A, Vol.550, pp.367-374, 2012.
20- Hosseini S.A., Hosseini M., Danesh Manesh H., "Bond strength evaluation of roll bonded bi-layer copper alloy strips in different rolling conditions", Materials and Design, Vol.32, pp. 176-181, 2011.
21- 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 and Design, Vol. 31, pp.4508-4513, 2010.
22- Abbasi M., Toroghinejad M.R., "Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips", Journal of Materials Processing Technology, Vol.210, pp.560-563, 2010.
23- Hosseini M., Danesh Manesh H., "Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding", Materials and Design, Vol.8, pp. 122-132, 2015.
24- Jamaati R., Toroghinejad M.R., "The Role of Surface Preparation Parameters on Cold Roll Bonding of Aluminum Strips", Materials Engineering and Performance, Vol. 20, pp. 191-197, 2011.
۲۵-شعبانی ع.، باقری ع ر.، "آزمون های مکانیکی مواد"، انتشارات سنا، ص ص. 101-114، 1394.
26- Gao C., Li L., Chen X., Zhou D., Tang C., "The effect of surface preparation on the bond strength of Al-St strips in CRB process", Materials and Design, Vol. 107, pp. 205-211, 2016.
27- Wang C., Jiang Y., Xie J., Zhou D., Zhang X., "Effect of the steel sheet surface hardening state on interfacial bonding strength of embedded aluminum–

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

steel composite sheet produced by cold roll bonding process", Materials Science and Engineering A, Vol. 652, pp. 51-58, 2016.
28- Jamaati R., Toroghinejad M.R., "Fabrication of MMC Strip by CRB Process", Materials Engineering and Performance, Vol. 21, pp. 859-864, 2012.
29- Govindaraj N.V., Lauvdal S., Holmedal B., "Tensile bond strength of cold roll bonded aluminium sheets", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, pp. 955-960, 2013.
30-Rabiei A., Vendra L., Kishi T., "Fracture behavior of particle reinforced metal matrix composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 39, pp. 294-300, 2008.
31- Zabihi M., Toroghinejad M.R., Shafyei A., "Shear punch test in Al/Alumina composite strips produced by powder metallurgy and accumulative roll bonding", Materials Science and Engineering A, Vol. 667, pp. 383–390, 2016.
32-Guduru R., Darling K., Kishore R., Scattergood R., Koch C., Murty K., "Evaluation of mechanical properties using shear–punch testing", Materials Science and Engineering: A, Vol. 395, pp. 307-314, 2005.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]