فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

عنوان مقاله: بررسی فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار ورق دو لایه جوش انفجاری شده مس- فولاد
دوره ۷/ شماره ۳ / پاییز ۱۴۰۲/ ص ۱۰۱ – ۸۶

بررسی فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار ورق دو لایه جوش انفجاری شده مس- فولاد

مجتبی عنبری
مربی فنی و حرفه ای

چکیده

با پیشرفت فناوری، نیاز به استفاده از مواد نوین احساس می‌شود. روش‌های جدیدی به‌منظور ساخت مواد جدید توسعه پیدا کرده‌اند. از مواد جدید در حال پیشرفت، می‌توان به ورق‌های دولایه اشاره کرد. این مواد دارای خواص ترکیبی از مواد متشکل هستند. هدف از این پژوهش تولید ورق دولایه فولاد زنگ‌نزن 304L و مس خالص و بهبود خواص مکانیکی این ورق با استفاده از فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار که یکی از روش‌های تغییر شکل شدید[۱]است. به این منظور، در ابتدا ورق دولایه از طریق جوش انفجاری[۲]تولید می‌شود، نمونه‌های منطبق با ابعاد قالب دستگاه نورد همسان در کانال زاویه‌دار آماده می‌شوند. در ادامه فرآیند کار مکانیکی در عبورهای مختلف انجام می‌پذیرد و خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و تجزیه و تحلیل نتایج انجام می‌پذیرد. این روش افزایش میکروسختی در نقاط مختلف از سطح مقطع ورق دولایه و استحکام را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که با افزایش تعداد عبورها خواص مکانیکی بهبود پیدا می‌کند. تعداد عبور دارای مقدار بهینه است که با تکرار فرآیند برای تعداد بیشتر از این مقدار بهینه، افت خواص مکانیکی مشاهده می‌شود. این روش فرآیندی نوین برای بهبود خواص مکانیکی را ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: نورد همسان در کانال زاویه‌دار ، تغییر شکل شدید، جوش انفجاری، میکروسختی، استحکام

[۱] Severe Plastic Deformation (SPD)

[۲] Explosive Welding

۱-مقدمه

صفحات فلزی از جمله مقاطع پراستفاده در کاربردهای مهندسی می‌باشند. در بسیاری از موارد نیاز است تا داخل و بیرون صفحه در شرایط محیطی متفاوتی قرار بگیرد، در نتیجه باید دو طرف صفحه خصوصیّات متفاوتی را دارا باشد. برای مثال یک طرف صفحه در شرایط دمای بالای کاری یا خورندگی محیطی قرار دارد، درحالی‌که طرف دیگر لوله نیازمند به قابلیت شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه به عنوان یک جزء ساختاری می‌باشد. آشکار است که یافتن چنین موادی در صنعت دشوار است. از این رو ترکیب و اتصال فلزات با جنس‌های مختلف برای ایجاد اجزایی با ویژگی‌های متفاوت ضروری به نظر می‌رسد. از صفحات دوفلزی در موارد مختلفی همچون صنایع نظامی، هسته‌ای، پتروشیمی، شیمیایی و هم‌چنین برای کاربردهایی مانند بویلر و مبدّل‌ها استفـــاده‌ی فراوانی می‌شود. اتصال فلزاتی نظیر مس، آلومینیوم، فولاد زنگ‌نزن، برنز، تیتانیوم و ... به یکدیگر و تولید یک ورق مرکب طیف وسیعی از سازه‌های مورد نیاز را در صنایع مرتبط در بر می‌گیرد.

بهبود خواص مکانیکی مواد نیز می‌تواند تا حدود زیادی در حل مشکلات صنعت مفید باشد. یکی از روش‌هایی که سبب استحکام‌بخشی مواد می‌شود، ریز کردن اندازه‌ی دانه در مواد می‌باشد. برای این کار می‌توان از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید استفاده نمود. از جمله این فرآیندها، فرآیند پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار و نورد در کانال زاویه‌دار همسان می‌باشد که مناسب برای ورق‌های فلزی است.

یکی از موارد مهم در استفاده صنعتی از مواد، استحکام و سختی و طول عمر مطلوب مواد است که منجر به پایین آمدن هزینه‌های بالای نگهداری و تعمیرات تجهیزات می‌شود. تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های ایجاد نانوساختاری از دانه‌های ریز و افزایش خواص مکانیکی فلزات است. فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک منجر به افزایش سختی و استحکام قطعات تولید شده از این ورق‌ها می‌شود.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده جهت بررسی فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار در ورق‌های کامپوزیتی چندلایه باید عواملی مانند اصطکاک، کرنش، نرخ کرنش، هندسه، خواص مواد و سرعت فرآیند بررسی شوند. به این ترتیب بر پایه پژوهش‌های موجود فرضیات تحقیق به صورت زیر در نظر گرفته می شوند:

۱. امکان نورد همسان در کانال زاویه‌دار ورق دولایه مس- فولاد وجود دارد.
۲. انجام فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار سبب کاهش اندازه دانه‌ها در ورق دولایه مس- فولاد خواهد شد.
۳. انجام فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار سبب افزایش استحکام و سختی ورق دولایه مس- فولاد خواهد شد.

اهداف تحقیق و بیان مساله

با توجه به موضوع پژوهش و تحقیقات پیشین در این زمینه جهت دست‌یابی به مدل مناسب و کاربردی اهداف به شرح زیر دنبال خواهند شد:

فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار از جمله فرآیندهای تغییر شکل شدید می‌باشد که جهت بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین امروزه استفاده از ورق‌های چندلایه فلزی به دلیل ترکیب خواص مختلف مدنظر محققین و صنایع قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش به بررسی فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار ورق‌های دولایه مس- فولاد می‌پردازیم و موارد زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱. تغییرات استحکام نمونه‌ها
۲. تغییرات سختی نمونه‌ها
۳. تغییر ریزساختار ورق‌ها در اثر فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار

پیشینه تحقیق

سیگال و همکاران، فرآیند پرس همسان در کانال زاویه‌دار را به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل شدید که قابلیت ریزدانه کردن ساختار در حد میکرومتر و در بعضی موارد حد نانومتر را دارد، اولین بار در سال ۱۹۷۰ معرفی کردند. اما در اوایل دهه نود بود که این روش به عنوان یکی از روش‌های مؤثر جهت ریزدانه کردن مواد درشت‌دانه و بدست آوردن خواص مکانیکی مناسب شناخته شد.

آزوشیما و همکاران، روش‌های ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید جهت دست‌یابی به دانه‌های کریستالی بسیار ریز را جمع‌بندی و بررسی نموده‌اند. در نتیجه با این بررسی، روش مکمل برای ایجاد خواص بهتر ارائه گردید. کاهش اندازه دانه منجر به افزایش تنش تسلیم و کاهش شکل‌پذیری می‌گردد، لذا جهت افزایش شکل‌پذیری می‌توان فرآیند آنیل را اعمال نمود. از آن‌جا که روش تغییر شکل پلاستیک شدید می‌تواند در تمام فلزاتی که قابلیت تغییرشکل خوبی را دارند، ریزساختار نانومتری ایجاد کند می‌توان با تولید قالب‌های بزرگ‌تر و با کاربرد بیشتر گستره کارایی این فرآیند را افزایش داد.

کاواکاج و همکاران، رفتار ماده در فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار را از روش المان محدود تحلیل نمودند. در این پژوهش ماده مورد آزمایش از جنس مس بوده و کرنش، نرخ کرنش، دما و تنش برای زوایای قالب مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. هم‌چنین اثر اصطکاک و زاویه قالب بر تنش، کرنش، توزیع و ناهمگنی کرنش، تغییر شکل برشی و گشتاور وارد بر غلتک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد برای زوایای قالب از ۹۰ تا ۱۲۰ درجه تغییر شکل پیچشی رخ می‌دهد، هم‌چنین مشخص شد با افزایش زاویه قالب کرنش کاهش می‌یابد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که تمام پارامترها با افزایش زاویه قالب کاهش می‌یابند.

عظیمی و همکاران، تأثیر پاس‌های مختلف فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار را بر روی خواص مکانیکی آلومینیوم ۱۱۰۰ بررسی کردند. این محققین گزارش کردند که در اولین پاس فرآیند، استحکام و سختی افزایش قابل توجهی پیدا کرده و چکش‌خواری کاهش می‌یابد. هم‌چنین گزارش شد که با اعمال بیش از ۴ پاس از فرآیند، ترک‌های سطحی در نمونه‌ها دیده می‌شود که خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد.

پارک و همکاران، نیز به بررسی تأثیر فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار بر روی ریزدانه‌سازی فولاد پرداختند. این محققین گزارش کردند که قسمت بیرونی نمونه الگوی دانه‌ای خم‌شده توسط تغییر شکل برشی در طول نورد همسان در کانال زاویه‌دار را نشان می‌دهد، در حالی‌که قسمت تغییرشکل نیافته نمونه دانه‌بندی اولیه عمود بر سطح نورد را نشان می‌دهد. به جز قسمت پایینی ورق که دانه‌بندی خمیده را نشان می‌دهد، جایی که به تناوب اثرات هندسی سنبه و ماتریس روی آن اثر می‌گذارد، بیشترین زاویه برشی، θ برابر با شده ۴۲ درجه است.

طالبیان و همکاران، به بررسی تولید ورق‌های چندلایه آلومینیوم و فولاد از طریق تغییرشکل شدید ناشی از نورد پرداختند. این محققین گزارش کردند که اگر ترکیب بین‌فلزی ایجاد شده ضخامت مناسبی داشته باشد، می‌توان یک فلز دو یا چندلایه با استحکام مناسب تولید کرد. گزارش شده است که ضخامت ترکیب بین‌فلزی ایجاد شده بین آلومینیوم و فولاد با افزایش زمان و دمای آنیل افزایش می‌یابد. هم‌چنین اعمال تغییرشکل پلاستیک بیشتر نیز باعث استحکام دهی و امکان دستیابی به استحکام بالاتر وجود دارد.

یافته ها

آزمون کشش نمونه‌های تحت نورد همسان در کانال زاویه‌دار

از ۶ نمونه آماده‌سازی شده، آزمون کشش انجام پذیرفت و نتایج مربوط به استحکام تسلیم و استحکام کششی در ادامه آورده می‌شود. تصاویر نمونه‌های کشیده شده در ۰ قابل مشاهده است.

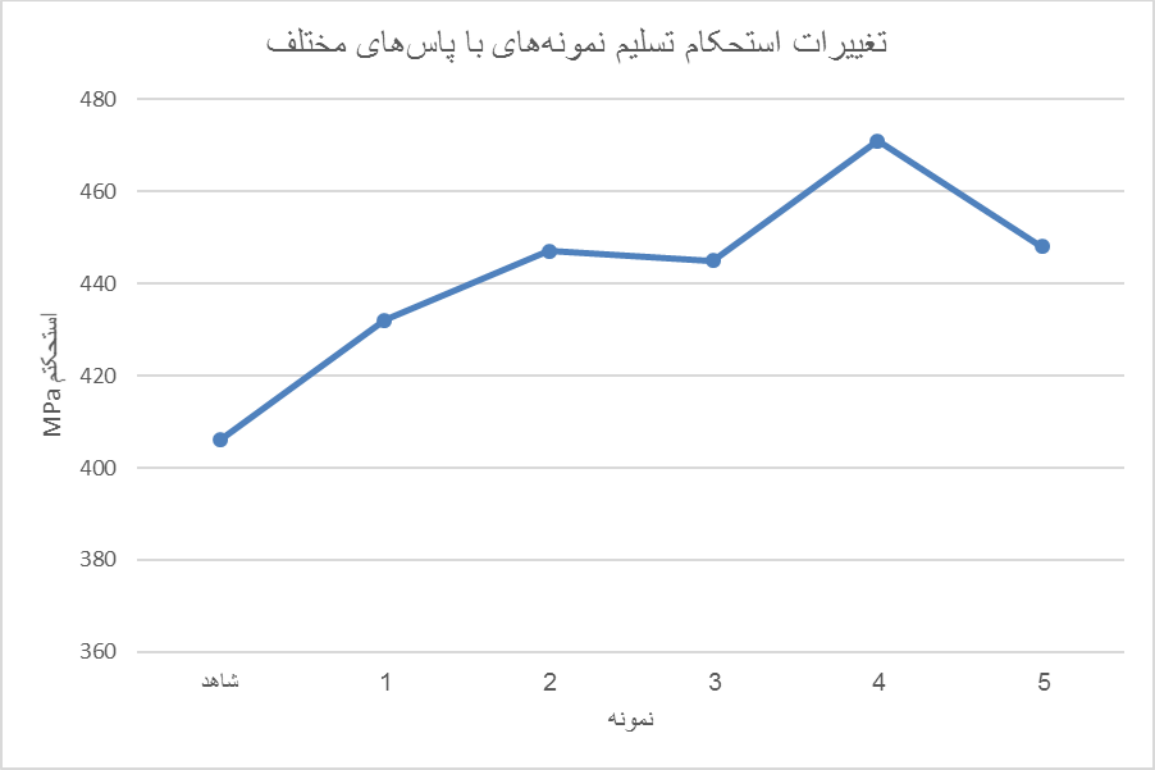
فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

تصاویر نمونه‌ها پس از آزمون کشش

بررسی روند تغییرات استحکام تسلیم

آزمون کشش برای نمونه‌های قرار گرفته در معرض فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار انجام پذیرفت و نتایج مربوط به استحکام تسلیم نمونه‌ها در ۰ به صورت نموداری آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر استحکام تسلیم متناظر با هر یک از نمونه‌های شاهد و نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده برای پاس‌های مختلف ۱ تا ۵ آورده شده است. نمودار تغییرات، روندی صعودی را با افزایش پاس‌ها نشان می‌دهد. به این‌صورت که برای نمونه شاهد از مقدار 406 MPa شروع می‌شود و با افزایش تعداد پاس‌ها این مقدار افزایش می‌یابد تا اینکه برای نمونه با تعداد پاس ۴، به بیشینه مقدار خود 471 MPa می‌رسد و پس از آن برای پاس ۵ به مقدار 448 MPa کاهش می‌یابد.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

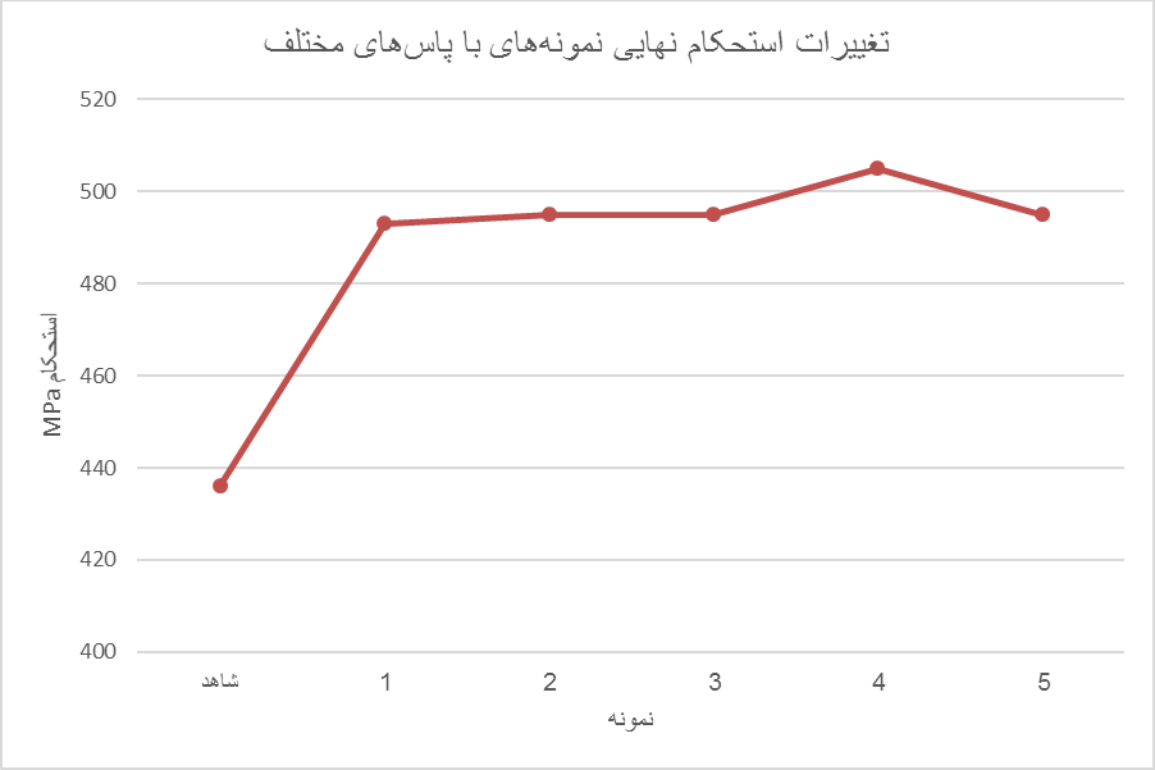


نمودار استحکام تسلیم نمونه‌ها تحت آزمون کشش

بررسی روند تغییرات استحکام نهایی

آزمون کشش برای نمونه‌های قرار گرفته در معرض فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار انجام پذیرفت و نتایج مربوط به استحکام نهایی کشش نمونه‌ها در ۰ به صورت نموداری آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر استحکام نهایی متناظر با هر یک از نمونه‌های شاهد و نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده برای پاس‌های مختلف ۱ تا ۵ آورده شده است. نمودار تغییرات، روندی صعودی را با افزایش پاس‌ها نشان می‌دهد. به این‌صورت که برای نمونه شاهد از مقدار 436 MPa شروع می‌شود و با افزایش تعداد پاس‌ها این مقدار افزایش می‌یابد تا اینکه برای نمونه با تعداد پاس ۴، به بیشینه مقدار خود 505 MPa می‌رسد و پس از آن برای پاس ۵ به مقدار 495 MPa کاهش می‌یابد.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

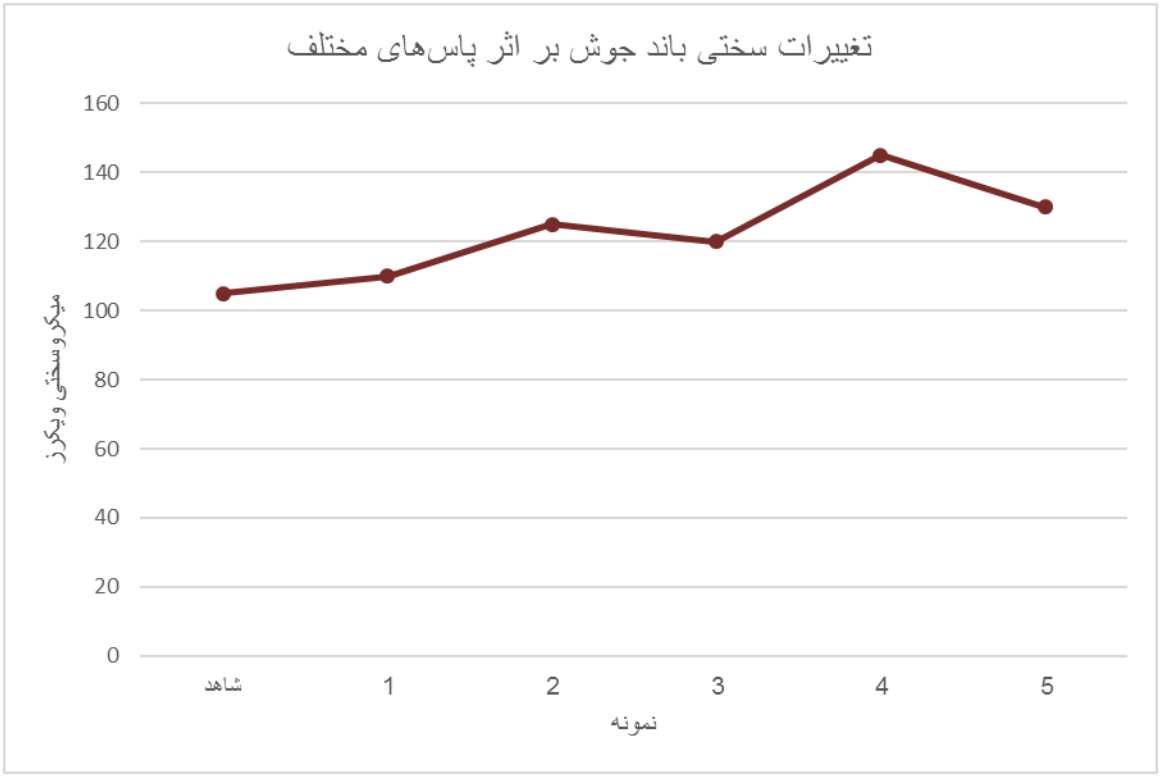


نمودار استحکام نهایی نمونه‌ها تحت آزمون کشش

نتایج میکروسختی

به منظور بررسی نتایج میکروسختی نمونه‌ها و مقایسه روند تغییر در این پارامتر، از سطح مقطع ورق دولایه نمونه تهیه گردید و مانت شد. بر روی سه قسمت سطح مقطع یعنی قسمت مسی، قسمت فولادی و باند جوش دو فلز آزمون میکروسختی انجام پذیرفت و نتایج مربوط به تغییرات این مقدار با افزایش تعداد پاس‌ها برای هر قسمت در نمودارهای جداگانه آمده است. تغییرات میزان میکروسختی باند جوش با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار در ۰ آمده است. تغییرات میزان میکروسختی قسمت مسی با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار در ۰ آورده شده است. تغییرات میزان میکروسختی قسمت فولادی با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار در ۰ قابل مشاهده است. تغییرات مقادیر میکروسختی در راستای ضخامت ورق دولایه مس- فولاد در ۰ آورده شده است.

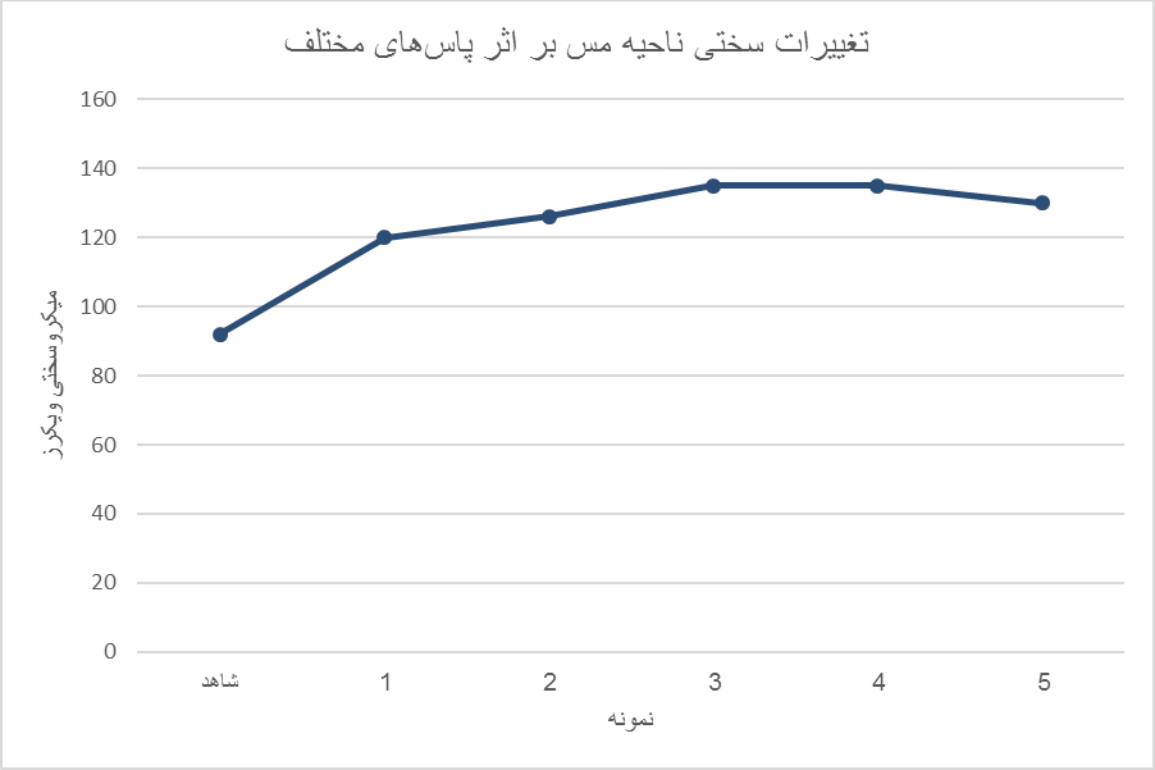
همانطور که در ۰ مشاهده می‌شود، تغییرات سختی در این منطقه با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند روندی صعودی دارد و با افزایش تعداد پاس‌ها افزایش در مقادیر میکروسختی باند جوش بین فولاد و مس مشاهده می‌شود. مقدار میکروسختی باند جوش برای نمونه شاهد که فرآیند مکانیکی بر روی آن انجام نشده است مقدار ۱۰۵ ویکرز را نشان می‌دهد. با انجام یک پاس فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار، این مقدار به ۱۱۰ ویکرز می‌رسد. با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند مقادیر میکروسختی افزایش می‌یابد تا اینکه برای نمونه با ۴ پاس، به بیشترین مقدار خود ۱۴۵ ویکرز می‌رسد. با افزایش پاس به ۵، میزان میکروسختی به عدد ۱۳۰ ویکرز کاهش می‌یابد.



نتایج آزمون میکروسختی ویکرز در باند جوش

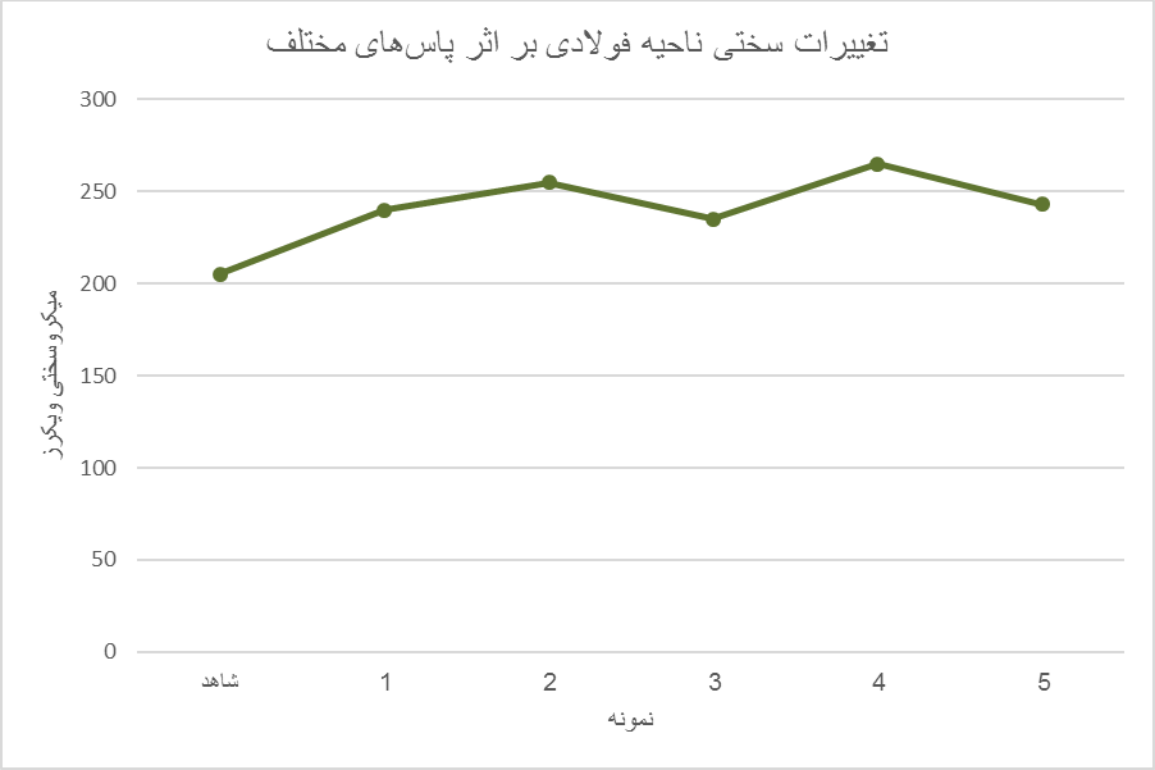
همانطور که در ۰ مشاهده می‌شود، تغییرات سختی در این منطقه با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند روندی صعودی دارد و با افزایش تعداد پاس‌ها افزایش در مقادیر میکروسختی ناحیه مس مشاهده می‌شود. مقدار میکروسختی ناحیه مس برای نمونه شاهد که فرآیند مکانیکی بر روی آن انجام نشده است مقدار ۹۲ ویکرز را نشان می‌دهد. با انجام یک پاس فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار، این مقدار به ۱۲۰ ویکرز می‌رسد. با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند مقادیر میکروسختی افزایش می‌یابد تا اینکه برای نمونه با ۴ پاس، به بیشترین مقدار خود ۱۳۵ ویکرز می‌رسد. با افزایش پاس به ۵، میزان میکروسختی به عدد ۱۳۰ ویکرز کاهش می‌یابد.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com



نتایج آزمون میکروسختی ویکرز در منطقه مس

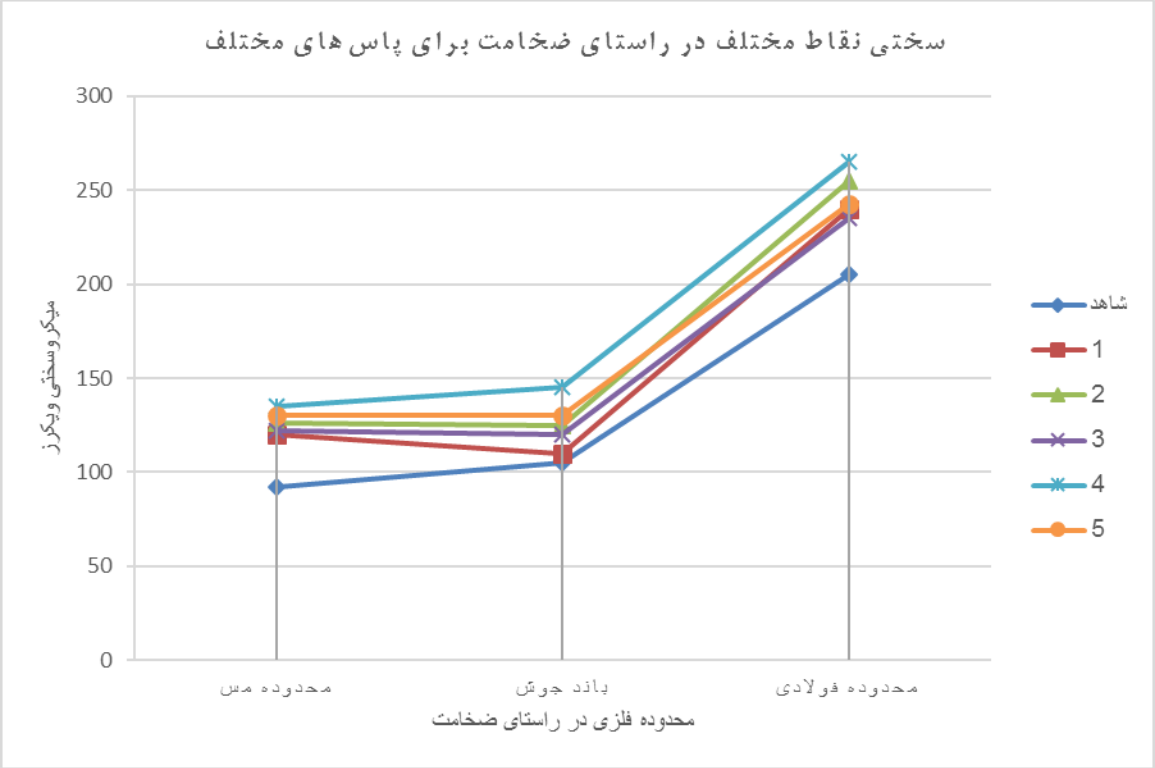
همانطور که در ۰ مشاهده می‌شود، تغییرات سختی در این منطقه با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند روندی صعودی دارد و با افزایش تعداد پاس‌ها افزایش در مقادیر میکروسختی ناحیه فولاد مشاهده می‌شود. مقدار میکروسختی ناحیه فولاد برای نمونه شاهد که فرآیند مکانیکی بر روی آن انجام نشده است مقدار ۲۰۵ ویکرز را نشان می‌دهد. با انجام یک پاس فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار، این مقدار به ۲۴۰ ویکرز می‌رسد. با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند مقادیر میکروسختی افزایش می‌یابد تا اینکه برای نمونه با ۴ پاس، به بیشترین مقدار خود ۲۶۵ ویکرز می‌رسد. با افزایش پاس به ۵، میزان میکروسختی به عدد ۲۴۳ ویکرز کاهش می‌یابد.



نتایج آزمون میکروسختی ویکرز در منطقه فولاد

در ۰ نمودار تغییرات مقادیر سختی در راستای ضخامت برای نمونه‌های با پاس‌های مختلف و نمونه شاهد آورده شده است. همانطور که قابل مشاهده است با حرکت از سمت مس به سمت فولاد عمدتا افزایش در مقادیر سختی قابل مشاهده است که این نشان‌دهنده سختی بینابینی محدوده باند جوش با مناطق مجاور است. البته در نمونه یک و سه سختی محدوده باند جوش مقادیر کمتری را نسبت به محدوده مس نشان می‌دهد. نکته قابل مشاهده دیگر در نمودار افزایش عمومی مقادیر سختی با افزایش تعداد پاس‌ها برای نمونه‌های مختلف است.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com



تغییرات مقادیر سختی در راستای ضخامت برای نمونه‌ها با پاس‌های مختلف

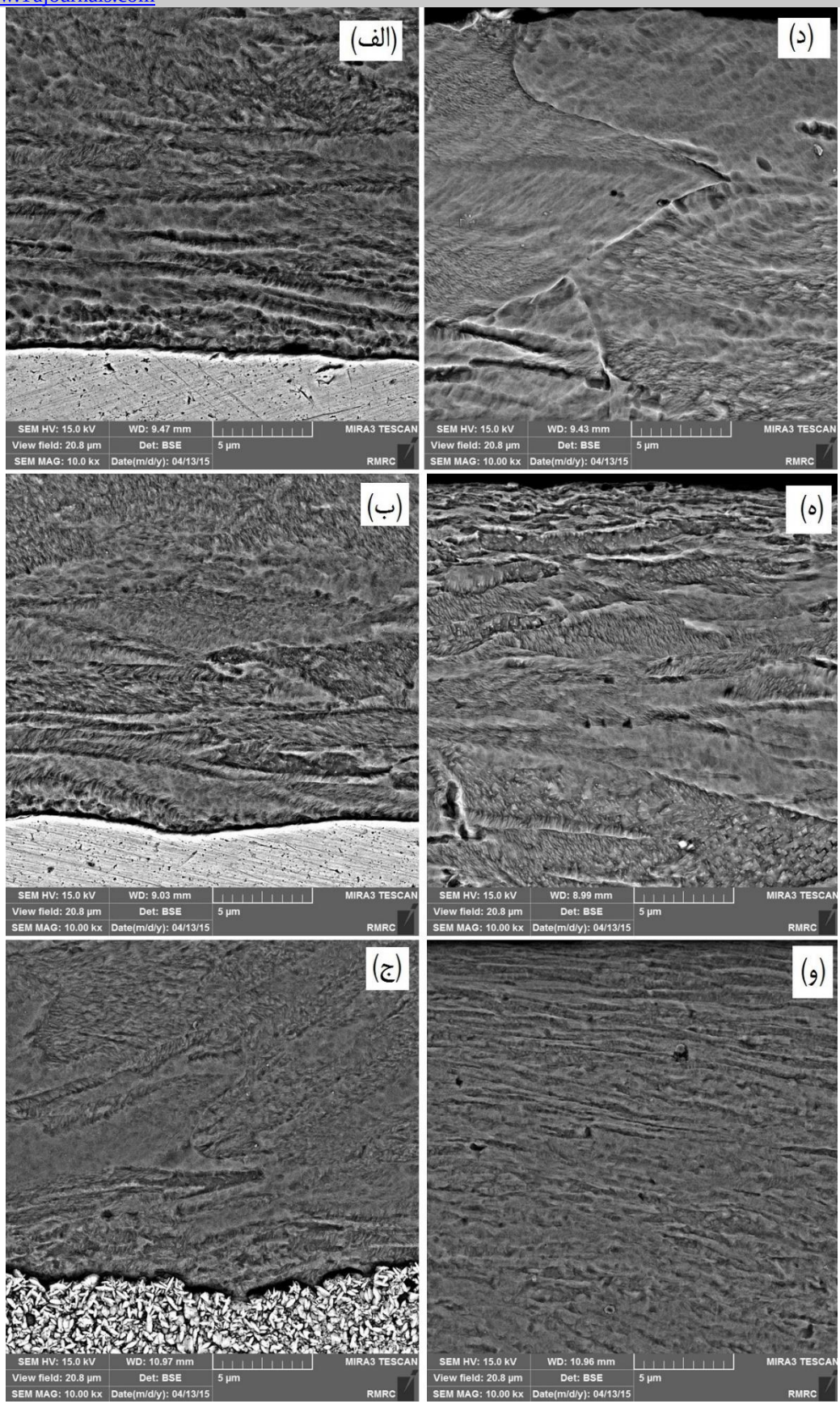
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM

به منظور بررسی تغییرات اندازه دانه بر اثر فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار در ورق دولایه مس- فولاد، تصویربرداری با استفاده میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع نمونه‌های نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده انجام پذیرفت. در ادامه تصاویر سطح مقطع نمونه‌های شاهد و نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده آمده است.

در ۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع نمونه‌های شاهد، نمونه ۲ پاس و نمونه ۴ پاس نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده قسمت فولادی در نزدیکی سطح خارجی و نزدیکی باند جوش آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تصویر الف تا تصویر ج که پاس‌های نورد همسان در کانال زاویه‌دار افزایش پیدا کرده است دانه‌های ساختار در نزدیکی باند جوش محدوده فولادی به سمت ریزتر شدن رفته‌اند. این تغییر اندازه از درشت دانه بودن به ریزدانه شدن در سطح خارجی فولاد نیز در تصاویر د تا و نیز قابل مشاهده است.

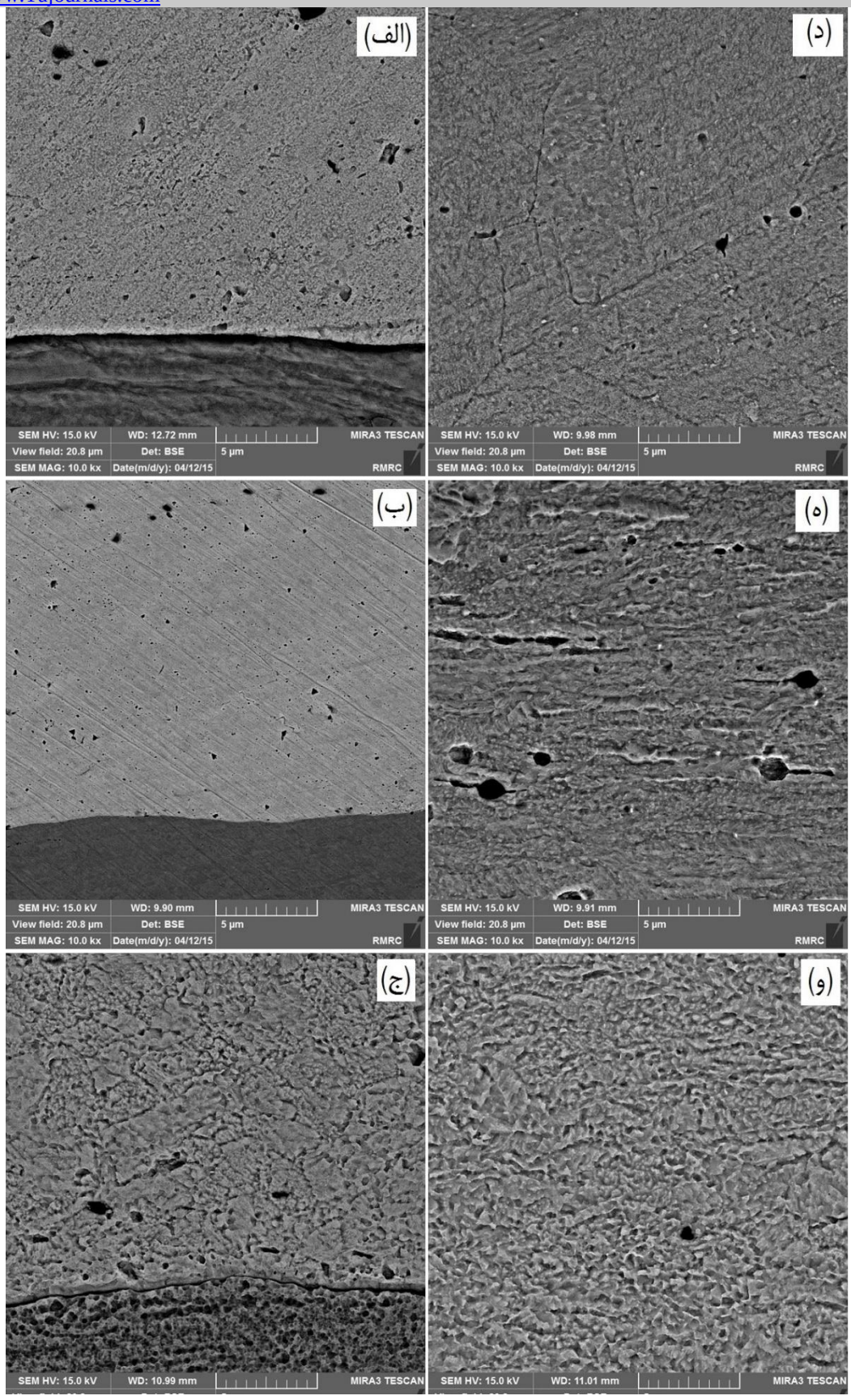
در ۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع نمونه‌های شاهد، نمونه ۲ پاس نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده و نمونه ۴ پاس نورد همسان در کانال زاویه‌دار شده قسمت مسی در نزدیکی سطح خارجی و نزدیکی باند جوش آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تصویر الف تا تصویر ج که پاس‌های نورد همسان در کانال زاویه‌دار افزایش پیدا کرده است دانه‌های ساختار در محدوده مسی نزدیک به باند جوش به سمت ریزتر شدن رفته‌اند. این تغییر اندازه از درشت دانه بودن به ریزدانه شدن در محدوده مسی نزدیک به سطح نیز در تصاویر د تا و نیز قابل مشاهده است.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com



تصویر میکروسکوپ الکترونی عمق مرکزی جوار باند جوش (الف) نمونه شاهد (ب) نمونه ۲ (ج) نمونه ۴- سطح خارجی(د) نمونه شاهد (ه) نمونه ۲ (و) نمونه ۴ قسمت فولادی

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۰۱-۸۶
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com



تصویر میکروسکوپ الکترونی عمق مرکزی جوار باند جوش (الف) نمونه شاهد (ب) نمونه ۲ (ج) نمونه ۴ - سطح خارجی (د) نمونه شاهد (ه) نمونه ۲ (و) نمونه ۴ قسمت مسی

نتیجه‌گیری

در این پروژه بررسی اثرات انجام عملیات نورد همسان در کانال زاویه‌دار بر روی خواص مکانیکی ورق دولایه مس- فولاد و تغییر در ریزساختار به عنوان هدف قرار داده شد. به این منظور نمونه‌ها مطابق با توضیحاتی که ارائه شد آماده گردید و با استفاده از دستگاه نورد همسان در کانال زاویه‌دار با تعداد ۱،۲،۳،۴ و ۵ پاس عملیات کار مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. در ادامه با استفاده از آزمایش‌های کشش، میکروسختی و میکروسکوپ الکترونی روبشی تغییرات روی خواص نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

در آزمایش کشش مشاهده کردیم که با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار استحکام تسلیم افزایش پیدا کرد. بیشترین مقدار در استحکام تسلیم برای نمونه با ۴ پاس گزارش شد و با افزایش تعداد پاس به ۵، کاهش در مقدار استحکام تسلیم دیده شد. بنابر این تعداد پاس بهینه برای رسیدن به بالاترین میزان افزایش در استحکام تسلیم ۴ پاس بدست آمد.

در مورد استحکام نهایی کشش نیز مشاهده گردید که با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار استحکام نهایی کشش افزایش پیدا کرد. بیشترین مقدار در استحکام نهایی کشش برای نمونه با ۴ پاس گزارش شد و با افزایش تعداد پاس به ۵، کاهش در مقدار استحکام نهایی کشش دیده شد. بنابر این اطلاعات، تعداد پاس بهینه برای افزایش استحکام کششی در این آزمایش تعداد ۴ پاس است.

در بررسی میزان میکروسختی سطح مقطع نمونه‌ها با افزایش تعداد پاس‌ها، مقادیر میکروسختی ویکرز در قسمت‌های مختلف به صورت عمومی نشان‌دهنده افزایش بود. روند کلی در هر سه منطقه مس، فولاد و باند جوش افزایش مقادیر میکروسختی است.

برای هر سه منطقه بالاترین مقدار میکروسختی مربوط به تعداد ۴ پاس است و بعد از این پاس، برای پاس پنجم افت مقادیر دیده شد.

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از سطح مقطع نمونه‌های شاهد، ۲ و ۴ نمونه مانت شده آماده گردید و پس از اچ کردن تصویربرداری انجام پذیرفت. در تصاویر مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد عبور در دستگاه نورد همسان در کانال زاویه‌دار دانه‌ها ریز می‌گردند و در نمونه شماره ۴ ساختار ریزدانه‌تر از سایر نمونه‌ها داریم.

فرآیند نورد در کانال همسان زاویه‌دار یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که برای تغییر شکل برشی ورق‌های فلزی قابل استفاده است. این فرآیند به عنوان فرآیندی پیوسته که قابلیت کار مکانیکی متناوب بدون کاهش ضخامت در ورق را دارد توانایی بهبود در خواص مکانیکی ورق را از خود نشان می‌دهد. به شکل یک جمع‌بندی نتایج زیر از این پژوهش بدست آمد:

با انجام فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار، در همان پاس اول افزایش در مقادیر استحکام تسلیم و کششی مشاهده شد. این افزایش را می‌توان به مکانیزم کارسختی در نمونه نسبت داد. با انجام فرآیند دانه‌های درشت و کشیده شکسته می‌شوند و دانه‌های فرعی با چگالی نابجایی بالا تشکیل می‌دهند. همانطور که ملاحظه گردید افزایش مقدار در استحکام کششی در پاس اول زیاد است و در پاس‌های بعدی این میزان افزایش از شدت کمی برخوردار است. که این کاهش شیب افزایش در مقادیر استحکام کششی را می‌توان ناشی از اشباع کرنش اعمالی و رسیدن چگالی نابجایی‌ها به حالت تعادل دانست.

افزایش مقادیر استحکام ناشی ریزدانه شدن ساختار است که این تغییرات اندازه دانه در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های شاهد و ۴ پاس قابل مشاهده است.

سختی نمونه‌ها با انجام فرآیندها با افزایش پاس‌ها، افزایش می‌یابد و بالاترین افزایش را در تعداد ۴ پاس فرآیند دیدیم.

در مجموع مشاهده شد که با انجام فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار که فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید است خواص مکانیکی استحکام تسلیم و کششی و همچنین میزان میکروسختی افزایش داشت. بهینه‌ترین تعداد پاس برای این فرآیند در این پژوهش ۴ پاس دیده شد. نتایج مربوط به ریزساختار که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه شاهد، ۲ و ۴ پاس گرفته شد حرکت ساختار به سمت ریزدانه شدن را نمایش داد که مکانیزم کارسختی را تایید می‌کند.

محدودیت‌های پژوهش

- در مورد دستگاه نورد همسان در کانال زاویه‌دار غلطک‌ها از اصطکاک لازم برای کشیدن نمونه‌ها به داخل برخوردار نبود و نمونه‌ها در بین غلطک‌ها لیز می‌خوردند و تغذیه نمونه به داخل قالب به سختی انجام پذیرفت.
- دستگاه نورد همسان در کانال زاویه‌دار مورد استفاده از لحاظ تامین توان مکانیکی با استفاده از موتور الکتریکی در حین فرآیند با مشکلاتی روبرو بود.
- سخت‌تر بودن انجام تعداد پاس‌های ۲ به بعد به علت افزایش میزان کارسختی
- اچ کردن ورق دولایه مس- فولاد به منظور مشاهده دانه‌ها زیر SEM دچار محدودیت فراوانی بود. به این صورت که محلول اچ یک جنس باعث آسیب رساندن به قسمت دیگر می‌شد و در نهایت با سختی‌های فراوان موفقیت نسبی در تصویربرداری حاصل گردید.

پیشنهادها

۱. بهینه‌سازی دستگاه $ECAR$ به منظور رسیدن به نتایج دقیق‌تر
۲. بررسی تاثیر عملیات حرارتی در فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار
۳. بررسی تغییرات باند جوش ورق‌های چندلایه در طول فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار
۴. بررسی خواص شکست و خستگی ورق‌های چندلایه بر اثر فرآیند نورد همسان در کانال زاویه‌دار

مراجع

[1] Yuan J, Pang Y, Li T. Multilayer clad plate of stainless steel/aluminum/aluminum alloy. J Wuhan Univ Technol-Mat Sci Edit. 2011;26:111-3.
[2] Kawase H, Makimoto M, Takagi K, Ishida Y, Tanaka T. Development of Aluminum-clad Steel Sheet by Roll-bonding. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1983;23:628-32.
[3] Eivani AR, Taheri AK. A new method for producing bimetallic rods. Materials Letters. 2007;61:4110-3.
[4] Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Progress in Materials Science. 2006;51:881-981.
[5] Beyerlein IJ, Tóth LS. Texture evolution in equal-channel angular extrusion. Progress in Materials Science. 2009;54:427-510.
[6] Nakashima K, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains. Materials Science and Engineering: A. 2000;281:82-7.
[7] Furukawa M, Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering: A. 1998;257:328-32.
[8] Furuno K, Akamatsu H, Oh-ishi K, Furukawa M, Horita Z, Langdon TG. Microstructural development in equal-channel angular pressing using a 60° die. Acta Materialia. 2004;52:2497-507.
[9] Nakashima K, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing. Acta Materialia. 1998;46:1589-99.

ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com
[10] Huang WH, Chang L, Kao PW, Chang CP. Effect of die angle on the deformation texture of copper processed by equal channel angular extrusion. Materials Science and Engineering: A. 2001;307:113-8.
[11] Djavanroodi F, Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation. Materials Science and Engineering: A. 2010;527:1230-5.
[12] Yamashita A, Yamaguchi D, Horita Z, Langdon TG. Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering: A. 2000;287:100-6.
[13] Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. The process of grain refinement in equal-channel angular pressing. Acta Materialia. 1998;46:3317-31.
[14] Xia K, Wang JT, Wu X, Chen G, Gurvan M. Equal channel angular pressing of magnesium alloy AZ31. Materials Science and Engineering: A. 2005;410–411:324-7.
[15] Tong LB, Zheng MY, Hu XS, Wu K, Xu SW, Kamado S, et al. Influence of ECAP routes on microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Ca alloy. Materials Science and Engineering: A. 2010;527:4250-6.
[16] Segal VM. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. Materials Science and Engineering: A. 1999;271:322-33.
[17] Meyers MA, Nesterenko VF, LaSalvia JC, Xue Q. Shear localization in dynamic deformation of materials: microstructural evolution and self-organization. Materials Science and Engineering: A. 2001;317:204-25.