



## بررسی تاثیر روش آماده‌سازی سطح و عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی ورق چندلایه Al/Al/Steel تولیدشده با نورد سرد

فرهاد آقاخانی مهیاری<sup>۱</sup>، حمیدرضا صفوی<sup>۲</sup>، عبدالحسین جلالی آقچای<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

### چکیده

استفاده از نورد سرد، یکی از روش‌های تولید ورق‌های چندلایه فلزی است. مزایای این روش نسبت به دیگر روش‌های تولید ورق چندلایه، باعث گسترده‌تری استفاده از آن در سال‌های اخیر شده است. وجود پارامترهای متعدد تأثیرگذار بر خواص مکانیکی و استحکام اتصال ورق‌های چندلایه‌ی تولیدشده با نورد سرد، موضوعات پژوهشی در این زمینه را گسترده و پراهمیت کرده است. در این مقاله با استفاده از روش تجربی، اثر چند پارامتر مؤثر از جمله دما و زمان عملیات حرارتی و نوع آماده‌سازی سطح ورق‌ها بر خواص مکانیکی ورق سه لایه AA5456/AA1020/St321 تولیدشده با نورد سرد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از دو روش سنباده‌زنی شامل سنباده پرده‌ای و سنباده استوانه‌ای برای آماده‌سازی سطح ورق‌ها استفاده شده و عملیات حرارتی هم در سه دمای ۳۱۰، ۳۵۵ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و سه مدت‌زمان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه انجام گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، بیشترین افزایش مقدار استحکام تسلیم در نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰°C و زمان ۶۰ دقیقه و آماده‌سازی سطح شده توسط سنباده استوانه‌ای به دست می‌آید.

**کلمات کلیدی:** اتصال دهی به روش نورد سرد؛ ورق ساندویچی؛ آلومینیوم/آلومینیوم/فولاد؛ خواص مکانیکی؛ استحکام تسلیم.

## An investigation into the effect of surface preparation method and heat Treatment on mechanical properties of multilayer Al / Al / Steel sheet produced by cold roll bonding

Farhad Agakhani Mahyari<sup>1</sup>, Hamid Reza Safavi<sup>2</sup>, Abdolhossein Jalali Aghchai<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

The use of cold rolling, is one of the methods of producing multilayer clad sheets. The advantages of this method over other methods of producing multilayer clad sheets have led to its widespread use in recent years. Existence of several parameters affecting the mechanical properties and bond strength of multilayer sheets produced by cold roll bonding, has made research in this field important. In this paper, using experimental method, the effect of several effective parameters such as temperature and time of thermal operation and type of sheet surface preparation on the mechanical properties of AA5456 / AA1020 / St321 three-layer sheet produced by cold rolling has been investigated. In this regard, two sanding methods including flap disc and Cylindrical Sandpaper have been used to prepare the surface of the sheets and heat treatment has been performed at three temperature levels of 310, 355 and 400 ° C for three periods of 30, 60 and 90 minutes. The results of these tests showed that the highest increase in tensile strength was obtained in the sample of heat treatment at a temperature of 400 ° C for 60 minutes and surface preparation by Cylindrical Sandpaper.

**Keywords:** Cold roll bonding; Sandwich clad sheet; Aluminum / Aluminum / Steel; Mechanical properties; Tensile strength.

## ۱- مقدمه

پیشرفت صنعت و فن‌آوری در زمینه‌های گوناگون نیازمند استفاده از مواد جدید با خواص و ویژگی‌های بهتر است. مواد مرکب فلزی به‌ویژه قطعات فلزی چندلایه، متشکل از دو یا چند فلز متفاوت از جمله مواد جدیدی هستند که در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به آن شده و استفاده از آن در صنایع پیشرفته روزبه‌روز در حال افزایش است. این مواد مرکب در مقایسه با آلیاژهای تشکیل‌دهنده آن اغلب دارای خواص بهتر مانند وزن کمتر، مقاومت در برابر حرارت و رطوبت بالاتر، رسانایی بهتر، مقاومت به خوردگی بالاتر و سختی و استحکام بیشتر هستند [۱،۲]. عموماً مواد مرکب فلزی به‌صورت گسترده‌ای در صنایع پیشرو از جمله هوافضا، هواپیماسازی، اتومبیل‌سازی، کشتی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون ورق‌هایی با جنس‌های مختلف نظیر آلومینیوم، منیزیم، روی، تیتانیوم، فولاد، نقره و مس برای تولید ورق چندلایه فلزی استفاده شده است [۳-۱۰]. در این میان ورق سه لایه آلومینیوم/آلومینیوم/فولاد خواص خوبی از خود نشان داده است. این ورق دارای خواص مکانیکی خوب، وزن کم و مقاومت در برابر خوردگی بالا است [۱۱-۱۳].

برای تولید مواد مرکب چندلایه فلزی و اتصال چندلایه فلز با جنس‌های گوناگون، روش‌های مختلفی توسعه داده شده است. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به جوشکاری انفجاری<sup>۱</sup> [۸،۱۴]، جوشکاری به روش اکستروژن<sup>۲</sup> [۱۵]، جوشکاری لب‌به‌لب فشاری<sup>۳</sup> [۱۶،۱۷] و اتصال به‌وسیله نورد گرم<sup>۴</sup> [۱۸،۱۹] و سرد<sup>۵</sup> اشاره کرد. از میان این روش‌ها، فرایند نورد سرد اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. به‌طور کلی فرایند نورد را می‌توان در زمره‌ی مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها به‌منظور شکل‌دهی فلزات قرار داد. یکی از مزایای اصلی نورد که استفاده از آن را به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های شکل‌دهی فلزات گسترش داده است، تولید پروفیل‌هایی از قطعات فلزی با طول بلند و سطح بزرگ با سرعت بالا و تا حدی به‌صورت پیوسته است [۲۰]. فرایند نورد سرد روشی مناسب برای تولید ورق‌های چندلایه فلزی نیز به‌حساب می‌آید. از میان

روش‌های تولید ورق چندلایه فلزی، فرایند نورد سرد روشی اقتصادی سریع و ایمن برای تولید ورق چندلایه است. استفاده از فرایند نورد در تولید محصولات فلزی چندلایه در قالب تجاری نخستین بار در سال ۱۹۵۰ میلادی توسط دورست<sup>۶</sup> آغاز گردید [۲۱]. مزایای قابل‌توجه این روش در تولید این دسته از محصولات، گسترش روزافزون اتصال دهی نوردی را از آن زمان تاکنون در پی داشته است [۲۱،۲۲]. تنوع محصولات تولیدی توسط اتصال دهی نوردی و کاربرد گسترده محصولات در صنایع گوناگون، بیانگر اهمیت نورد در تولید محصولات لایه‌ای است.

تاکنون مدل‌های ریاضی زیادی برای توصیف فرایند نورد ورق چندلایه‌ی فلزی توسعه داده شده است. دانش منش<sup>۷</sup> و همکارانش [۲۳]، مدل ریاضی برای بررسی فرایند اتصال دهی نورد سرد تسمه‌های دولایه ارائه کرده‌اند. در این مدل که بر مبنای تئوری کران بالایی است، یک میدان شار داخلی برای توصیف سیلان ماده ضمن تغییر شکل، ایجاد شده و بر این اساس رفتار تغییر شکل پلاستیک تسمه در فضای میان غلتک‌ها بررسی شده است. وانگ<sup>۸</sup> و همکارانش [۲۴]، با استفاده از روش تابع جریان<sup>۹</sup> و تئوری کران بالایی یک مدل ریاضی برای بررسی رفتار تغییر شکل پلاستیک لایه‌ها در فضای بین غلتک‌ها ضمن فرایند نورد نامتقارن تسمه‌های دولایه ارائه کرده‌اند. تزو<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۲۵]، با استفاده از روش تحلیل قاچی به مطالعه میدان تنشی در فرایند اتصال دهی نورد سرد و گرم تسمه‌های دولایه پرداخته‌اند. به بیان دقیق‌تر توزیع فشار، تنش برشی در فصل مشترک، نیرو و گشتاور نورد با استفاده از این روش ارزیابی شده است.

در روش اتصال دهی به روش نورد سرد پارامترهای مختلفی در خواص مکانیکی ورق‌ها از جمله سختی سطح، استحکام تسلیم و استحکام نهایی تأثیرگذارند از جمله، روش‌های آماده‌سازی سطح مواد، زبری سطح و سختی آن، عملیات حرارتی قبل و پس از انجام فرایند، دماها و زمان‌های مختلف عملیات حرارتی، کاهش در ضخامت، ضخامت اولیه لایه‌ها و کار سختی انجام‌شده در حین فرایند [۲۶-۲۹]. علاوه

<sup>7</sup> Daneshmanesh<sup>8</sup> Wang<sup>9</sup> Stream Function<sup>10</sup> Tzoua<sup>1</sup> Explosion welding<sup>2</sup> Extrusion welding<sup>3</sup> Butt welding<sup>4</sup> Hot roll bonding<sup>5</sup> Cold roll bonding<sup>6</sup> Durst

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر زمان و دمای بازپخت و همچنین نوع آماده‌سازی سطح بر خواص مکانیکی ورق سه لایه با جنس AA5456/AA1020/St321 با استفاده از روش تجربی است. در واقع می‌توان نوآوری این پژوهش را در ساخت ورق سه لایه AA5456/AA1020/St321 با استفاده از نورد سرد و با درصد کاهش ضخامت ۵۰٪ نسبت به ضخامت اولیه و بررسی پارامترهای اشاره‌شده بر خواص مکانیکی این ورق دانست. در این پژوهش استحکام و سختی ورق در سه سطح دما و زمان بازپخت و دو روش سنباده‌زنی با استفاده از سنباده پره‌ای<sup>۵</sup> و سنباده استوانه‌ای<sup>۶</sup> سنجیده می‌شود؛ همچنین باقی پارامترهای تأثیرگذار به‌گونه‌ای تنظیم شده که ورق استحکام اتصال بالایی داشته باشد. در نهایت با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها شرایط مناسب برای رسیدن به بیشترین استحکام و سختی سطح معرفی می‌گردد.

## ۲- طراحی آزمایش

در این پژوهش فرایند سنباده‌زنی در مرحله‌ی آماده‌سازی سطح ورق‌ها به‌عنوان پارامتر گسسته و تغییرات دما و زمان عملیات حرارتی در سه سطح، بعد از مرحله نورد سرد به‌عنوان پارامترهای پیوسته‌ی طراحی آزمایش تعیین شده است. دو روش آماده‌سازی سطح لایه‌ها با استفاده از ابزارهای سنباده پره‌ای و سنباده استوانه‌ای انتخاب شده است. برای دمای عملیات حرارتی سطوح ۳۱۰، ۳۵۵ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و برای زمان آن سطوح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه انتخاب شد. دلیل انتخاب این بازه برای دما و زمان عملیات حرارتی این بود که احتمال تشکیل ترکیب فلزی AL/Fe که در واقع باعث ایجاد لایه‌ای شکننده در بین دو ورق شده و از استحکام تسلیم و استحکام اتصال ورق می‌کاهد در دمای بالای ۴۰۰°C و زمان بیشتر از ۹۰ دقیقه به‌شدت افزایش می‌یابد؛ همچنین دمای کمتر از ۳۰۰°C برای عملیات حرارتی عملاً تأثیر ناچیزی بر خواص مکانیکی ورق دارد [۳۵].

بر اساس روش آماده‌سازی سطح لایه‌ها، آزمایش‌ها به دو بخش کلی تقسیم می‌شود: تعداد ۹ آزمایش برای روش آماده‌سازی سطح توسط سنباده پره‌ای و ۹ آزمایش برای روش

بر تأثیر این پارامترها بر خواص مکانیکی، استحکام اتصال<sup>۱</sup> ورق‌ها نیز از این پارامترها تأثیر می‌گیرند [۳۱، ۳۰، ۱۲]. تاکنون پژوهش‌های زیادی برای بررسی تأثیر این پارامترها روی خواص مکانیکی و استحکام اتصال ورق‌های چندلایه فلزی با جنس‌های گوناگون انجام گرفته است. عابدی<sup>۲</sup> و همکارانش [۳۱]، در پژوهشی تجربی، پارامترهای مؤثر در اتصال سه‌لایه St/AZ31/St با استفاده از فرایند اتصال دهی نورد را بررسی کرده‌اند. همچنین، مکانیزم پیوند و اثر آن را بر خواص مکانیکی مواد چندلایه مورد مطالعه قرار داده‌اند. تانگ<sup>۳</sup> و همکارانش [۳۲]، اتصال دهی نورد سرد ورق دولایه Al-St را با استفاده از دو روش آماده‌سازی سطح، شامل برس سیمی و سمباده نواری مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش ویژگی‌هایی مانند استحکام سطح اتصال، آستانه تغییر شکل و ریزساختار فصل مشترک، در نمونه‌ها ارزیابی و مقایسه شده است. شعبانی<sup>۴</sup> و همکارانش [۳۳]، تأثیر لایه نازک میانی Ni بر خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیت Al-Cu ساخته‌شده به‌روش اتصال دهی نورد سرد را بررسی نموده‌اند. در این مطالعه خواص مکانیکی و استحکام باند اتصال با ایجاد لایه میانی نیکل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تانگ<sup>۵</sup> و همکارانش [۳۴]، مکانیزم اتصال در فصل مشترک ورق کامپوزیت دولایه آلومینیوم و استیل را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه آزمایش‌ها بر روی ورق دولایه آلومینیوم آلیاژی 4A60 و ورق فولاد 08AL تولیدشده توسط اتصال دهی نورد سرد انجام شده و مکانیزم پیوند در فصل مشترک دولایه در حین فرایند تولید کامپوزیت لایه‌ای فلزی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان افزایش و کاهش ناهمواری و زبری در سطوح فلزی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر استحکام پیوند لایه‌ها است. باوجود اینکه در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی روی ورق‌های چندلایه فلزی ساخته‌شده با استفاده از فرایند نورد سرد و پارامترهای تأثیرگذار بر آن انجام شده است، اما به دلیل گستردگی این پارامترها و همچنین تنوع در جنس اولیه‌ی ورق‌ها این تحقیقات همچنان ادامه دارد.

<sup>5</sup> Tang

<sup>6</sup> Flap disc

<sup>7</sup> Cylindrical Sandpaper

<sup>1</sup> Bond strength

<sup>2</sup> Abedi

<sup>3</sup> Tang

<sup>4</sup> Shabani

قبل از انتقال نمونه‌ها به محل انجام فرایند نورد سرد، سطح نمونه‌ها با غوطه‌ور شدن در محلول اسید فلئوئوریدریک از هرگونه چربی و آلودگی تمیز شد. اسید فلئوئوریدریک می‌تواند چربی، آلودگی و بسیاری از مواد به‌خصوص اکسیدها را در خود حل کند [۹].

در مرحله‌ی بعد از آماده‌سازی شیمیایی سطح ورق‌ها، آماده‌سازی فیزیکی این ورق‌ها با دو روش و توسط ابزارهای سنباده پره‌ای و سنباده استوانه‌ای از جنس زیرکونیم انجام پذیرفت.

در استفاده از سنباده پره‌ای، عملیات سنباده‌زنی پس از نصب پره‌ای با دانه‌بندی P40 روی دستگاه مینی فرز و با سرعت چرخش ۱۱۰۰۰ دور بر دقیقه بر روی سطوح ورق‌ها اجرا شد. این نوع ابزار ساینده، فشار را به سطح به‌طور یکسان وارد می‌نماید.

در آماده‌سازی سطح توسط سنباده استوانه‌ای هم پس از نصب سنباده استوانه‌ای با دانه‌بندی P40 روی دستگاه دریل، عملیات سنباده‌زنی در باند اتصال با سرعت ۲۸۰۰ دور در دقیقه صورت گرفت. آماده‌سازی سطح در این روش به‌صورت خطی و در جهت نورد صورت می‌پذیرد.

## ۲-۲- تولید ورق سه‌لایه فلزی

ورق‌ها در ابتدا با ابعاد  $30\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  برش داده شده و پس از انجام مراحل قبل، سوراخی در سر ورق‌ها ایجاد و هر سه‌لایه به یکدیگر پرچ شدند. این کار برای جلوگیری از حرکت لایه‌ها و گیر مناسب میان غلتک‌های نورد انجام پذیرفت. ضخامت اولیه‌ی ورق St321، ۲mm، ورق AA1020، ۲mm و ورق AA5456، ۱/۵ mm بوده که با انجام عملیات آماده‌سازی سطح به‌تقریب ۰/۱mm از ضخامت هر ورق کاسته شده و مجموع ضخامت ورق سه لایه ۴/۲mm شد.

در شکل ۱ طرح شماتیکی از فرایند ساخت ورق سه لایه با جنس AA5456/AA1020/St321 با استفاده از فرایند نورد سرد و همچنین شکل قرارگیری این سه صفحه‌ی فلزی روی یکدیگر نمایش داده شده است.

آماده‌سازی سطح توسط سنباده استوانه‌ای، در مجموع تعداد ۱۸ آزمایش تعریف می‌شود. جدول ۱ پارامترهای گسسته و پیوسته به همراه سطوح تعریف شده در طراحی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱ - پارامترهای گسسته و پیوسته طراحی آزمایش

زمان عملیات (min)			دمای عملیات حرارتی (C°)	روش آماده‌سازی سطح
حرارت				
۳۰	۶۰	۹۰	۳۱۰	سنباده پره‌ای
F5	F13	F1		
F4	F9	F18	۳۵۵	سنباده استوانه‌ای
F10	F8	F6		
B4	B5	B15	۳۱۰	سنباده استوانه‌ای
B2	B7	B3		
B19	B11	B12	۴۰۰	

## ۲-۱- شرح مراحل ساخت نمونه‌ها

### بازپخت اولیه ورق‌های فولادی و آلومینیومی

برای انجام عملیات حرارتی ورق‌ها قبل از فرایند نورد، نمونه‌ها به دودسته تقسیم شدند؛ دسته اول ورق‌های AA و AA1020 و 5456 برای بازپخت ابتدائی در دمای  $400\text{ C}^\circ$  و زمان دو ساعت در کوره قرارگرفته و برای جلوگیری از شوک حرارتی، داخل کوره تا رسیدن به دمای محیط به‌آرامی در کوره سرد شدند. دسته دوم ورق‌های St321 برای بازپخت ابتدائی در دمای  $1000\text{ C}^\circ$  و زمان یک ساعت داخل کوره الکتریکی قرارگرفته، سپس تا رسیدن به دمای محیط به‌آرامی در کوره سرد شدند. دلیل بازپخت اولیه‌ی ورق‌ها اطمینان از یکنواختی خواص مکانیکی آن در سرتاسر ورق‌ها و رفع ناهمگنی‌های احتمالی در این خواص بوده است [۳۶].

### فرایند آماده‌سازی شیمیایی و فیزیکی سطح لایه‌ها

برای استحکام اتصال مناسب بین ورق‌ها، آماده‌سازی سطح لایه‌ها می‌بایست به فاصله کوتاهی قبل از انجام فرایند اتصال دهی به روش نورد سرد انجام بگیرد. هرچقدر زمان آماده‌سازی تا انجام نورد سرد کوتاه‌تر باشد، سطح ورق‌های آلومینیومی فرصت کمتری برای اکسید شدن دارند، در نتیجه شرایط بهتری برای ایجاد اتصال فراهم می‌آید.



شکل ۲- نمونه‌های ورق سه‌لایه فلزی تولید شده به روش اتصال دهی نورد سرد (ب) سطح مقطع ورق سه‌لایه فلزی St 321/AA 1020/AA 5456

### ۳- نتایج و بحث

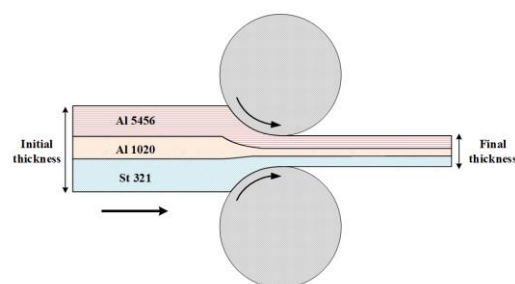
برای بررسی تأثیر فرایند نورد سرد و پارامترهای مؤثر بر آن در خواص مکانیکی ورق مورد بحث، ابتدا خواص مکانیکی ورق‌ها به صورت تکی سنجیده می‌شود. در همین راستا نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های کشش تک‌محوری و همچنین ریز سختی سنجی از نوع میکرو ویکرز، بر روی هر یک از ورق‌های آلایژی St321/AA1020/AA5456 و مشخصات مکانیکی آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- خواص مکانیکی ورق‌های St 321/AA 1020/AA 5456

عنصر آلیاژی	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش شکست	سختی (HV)
St 321	۲۳۳	۶۲۷	۴۰	۱۶۰±۲
Al 1020	۳۷	۹۵	۴۶	۱۸,۵±۲
Al 5456	۱۵۵	۳۶۰	۲۱,۶	۸۶,۵±۲

### ۳-۱- سختی سطح ورق سه لایه

در این بخش سختی لایه‌های ورق فلزی سه‌لایه St321/AA1020/AA5456، در شرایط قبل از عملیات حرارتی و بعد از عملیات حرارتی مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. شکل ۳ نتایج حاصل از ریز سختی سنجی از سطح مقطع عرضی لایه AA5456 را پس از بازپخت در شرایط دماها و زمان‌های جدول طراحی آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح شماتیک از فرایند ساخت ورق سه لایه AA 5456/AA1020/St321 به روش نورد سرد

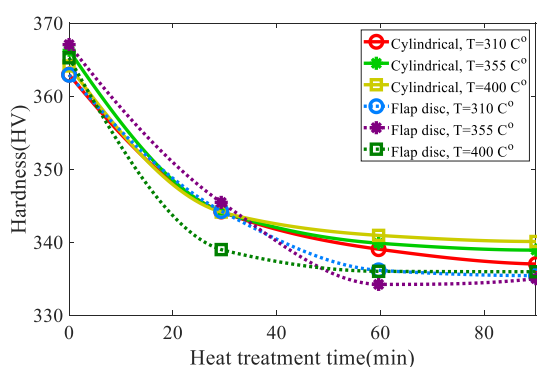
در جدول ۲ پارامترهای دستگاه نورد آزمایشگاهی ذکر شده است. قبل از عملیات نورد، تمیزکاری سطح غلتک‌ها به وسیله پارچه نخی آغشته به استون انجام شد.

جدول ۲- پارامترهای دستگاه نورد آزمایشگاهی

۵۰	میزان کاهش ضخامت در یک‌راه نورد (%)
۲۰	حداکثر نیروی نورد (ton)
۲۰۰	طول غلتک (mm)
۱۵۰	قطر غلتک (mm)
۲۴/۵	سرعت چرخش غلتک (rpm)

در مرحله بعد تنظیمات مربوط به کاهش ۵۰٪ ضخامت در فاصله دو غلتک دستگاه نورد انجام شد. سپس در زمانی کمتر از دو دقیقه از اتمام مرحله آماده‌سازی سطح ورق‌ها، فرایند اتصال دهی نورد سرد در دمای محیط طی یک‌راه نورد صورت گرفت؛ در نتیجه ورق سه‌لایه فلزی تولید گردید. نکته قابل توجه در این مرحله ضرورت رعایت زمان کمتر از دو دقیقه برای انجام نورد پس از آماده‌سازی سطح برای جلوگیری از تشکیل لایه مخرب اکسید روی سطح ورق‌ها است. شکل ۲ الف نمونه ورق سه‌لایه فلزی تولید شده به روش اتصال دهی نورد سرد و شکل ۲ ب سطح مقطع این ورق را نشان می‌دهد. در مرحله‌ی نهایی، ورق ساخته شده مجدداً تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. برای این عملیات حرارتی، دما و زمان بازپخت به عنوان پارامترهای متغیر ورودی در نظر گرفته شده و سیکل دما و زمان برای آن مطابق آنچه پیش از این در جدول ۱ نشان داده شد، انتخاب گردید.

AA1020 و AA5456 در این دما، فرایند عملیات حرارتی نمونه‌ها در محدوده دمایی  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $310^{\circ}\text{C}$  انجام پذیرفت. پس از انجام عملیات حرارتی، نتایج نشان داد که ریز سختی در تمامی نمونه‌های آزمایش نسبت به پیش از انجام عملیات حرارتی کاهش یافته است. بررسی تغییرات سختی، کاهشی در حدود ۷٪ سختی را بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۴ و ۳ می‌توان گفت، دمای عملیات حرارتی و نوع آماده‌سازی سطح تأثیر زیادی بر سختی ورق ندارد، ولی زمان عملیات حرارتی پارامتری تأثیرگذار است.



شکل ۴- اثر دما و زمان بازپخت بر تغییرات سختی لایه آلیاژ St321 آماده‌سازی سطحی شده تحت روش‌های سنباده استوانه‌ای و سنباده پره‌ای

### ۳-۲- استحکام تسلیم ورق سه لایه

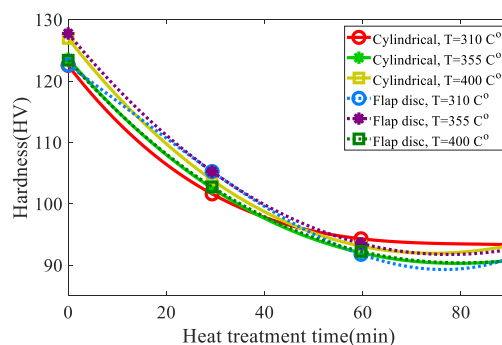
در شکل ۵ نمونه آماده‌شده برای آزمایش کشش تک‌محوری مشاهده می‌شود. بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده از این آزمایش، پارامترهای خواص کششی ورق فلزی سه‌لایه، St321/AA1020/AA5456 بعد از عملیات حرارتی مورد بحث و تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. نمونه‌های آماده‌سازی شده برای آزمایش کشش تک‌محوری، از راستای موازی با نورد ورق تهیه شده است؛ بنابراین داده‌های به‌دست‌آمده از این آزمون برای تمامی نمونه‌ها، نشان‌دهنده استحکام ورق در راستای نورد است.

در شکل ۶ نمودار تنش-کرنش یک نمونه ورق سه لایه قبل از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است. تغییرات مشاهده شده در شیب این نمودار تا نقطه رسیدن به استحکام نهایی به این دلیل است که این نمونه از سه ورق مختلف با خواص

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه تغییرات سختی لایه AA5456 در مراحل قبل و بعد از بازپخت به نظر می‌رسد، طی فرایند بازپخت نرم شدن ماده رخ داده و از سختی کاسته می‌شود. لازم به یاد آوری است، محدوده دمای مناسب تبلور مجدد برای آلیاژهای آلومینیوم بسته به میزان کار سرد  $340^{\circ}\text{C}$  -  $400^{\circ}\text{C}$  است [۳۷]؛ بنابراین، انتخاب دمای  $400^{\circ}\text{C}$  برای اطمینان از تبلور مجدد در لایه AA5456 انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد.

با تحلیل تغییرات سختی این مطلب مشخص می‌شود که مقدار کاهش سختی بعد از بازپخت در حدود ۲۵٪ اتفاق افتاده است. روند کاهش سختی از زمان اولیه در هر سه دمای آزمایش شروع شده و تقریباً تا رسیدن به زمان ۶۰ دقیقه این روند کاهشی ادامه داشته است.

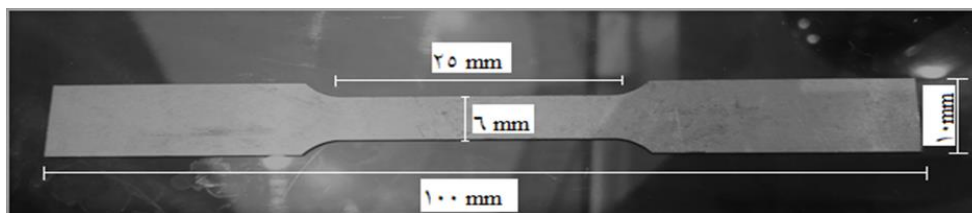
پس‌از آن میزان سختی تا رسیدن به زمان ۹۰ دقیقه تقریباً ثابت بوده و میزان سختی بدون تغییر است.



شکل ۳- اثر دما و زمان بازپخت بر تغییرات سختی لایه آلیاژ AA5456 آماده‌سازی سطحی شده تحت روش‌های سنباده استوانه‌ای و سنباده پره‌ای

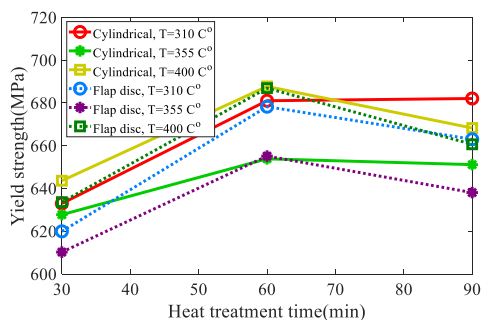
شکل ۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی در سطح مقطع عرضی لایه فولاد زنگ نزن عملیات حرارتی شده منطبق با دماها و زمان‌های جدول طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ریز سختی سنجی و مقایسه تغییرات سختی لایه St321، در مراحل قبل و بعد از عملیات حرارتی می‌توان دریافت، نرخ تغییرات سختی در این لایه نیز روند کاهشی داشته است. همان‌طور که پیش‌از این گفته شد، دمای مناسب بازپخت آلیاژ St321 دمایی بین  $955^{\circ}\text{C}$  تا  $1120^{\circ}\text{C}$  است؛ اما به دلیل ذوب لایه‌های آلومینیومی





شکل ۵- نمونه کشش طولی طبق استاندارد ASTM E8(M)

مخصوصاً در دولایه آلومینیوم کاسته شده و هم‌زمان با افزایش انعطاف‌پذیری استحکام تسلیم ورق کاهش می‌یابد. مطابق این نمودار دیده می‌شود، آماده‌سازی سطح ورق‌ها با سنباده استوانه‌ای تأثیر بهتری در افزایش استحکام تسلیم ورق داشته است. این اختلاف در دو زمان ۳۰ و ۹۰ دقیقه برای عملیات حرارتی بیشتر و در ۶۰ دقیقه کمتر بوده است.

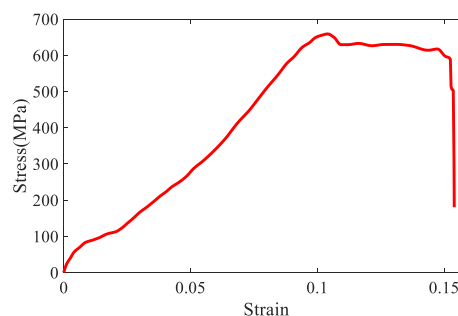


شکل ۷- اثر زمان عملیات حرارتی بر استحکام تسلیم ورق سه‌لایه فلزی St321/AA1020/AA5456 آماده‌سازی سطحی شده تحت روش‌های سنباده استوانه‌ای و سنباده پره‌ای

برای مثال استحکام تسلیم نمونه در دمای  $310^{\circ}\text{C}$  و زمان ۳۰ دقیقه آماده‌سازی شده توسط سنباده پره‌ای حدود  $620\text{MPa}$  و در نمونه آماده‌سازی سطح شده توسط سنباده استوانه‌ای این مقدار  $633\text{MPa}$  است و پس از رسیدن زمان حرارت دهی به ۶۰ دقیقه استحکام به ترتیب به  $678\text{MPa}$  و  $681\text{MPa}$  افزایش یافته و در ادامه با افزایش زمان حرارت دهی به ۹۰ دقیقه استحکام به  $662\text{MPa}$  و  $682\text{MPa}$  می‌رسد.

برای بررسی اثر افزایش دمای عملیات حرارتی بر استحکام تسلیم، نمودارهای استحکام برحسب دما در یک درصد کاهش ضخامت به ضخامت اولیه ثابت ۵۰٪ رسم

مکانیکی متفاوت تشکیل شده است که هرکدام از این مواد استحکام تسلیم و نهایی مختص به خودشان را دارند. در این مطالعه استحکام تسلیم ورق در همان محدوده استحکام نهایی فرض شده است؛ یعنی در نقطه‌ای که بعد از آن هر سه ماده وارد ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک می‌شوند. نمودار تنش-کرنش سایر نمونه‌ها پیش از عملیات حرارتی هم مشابه این نمودار بوده و استحکام تسلیم این نمونه‌ها حدوداً  $630\text{MPa}$  بوده است.



شکل ۶- نمودار تنش-کرنش یک نمونه ورق سه لایه پیش از انجام عملیات حرارتی

شکل ۷ نمودار تغییرات استحکام نمونه‌های ورق سه‌لایه فلزی را بر حسب زمان عملیات حرارتی در سه دمای  $310^{\circ}\text{C}$ ،  $355^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد و کاهش ضخامت ثابت ۵۰٪ نشان می‌دهد.

تحلیل نتایج آزمایش کشش تک‌محوره، مشخص می‌کند با افزایش زمان عملیات حرارتی ابتدا استحکام تسلیم افزایش و سپس با شیب ملایم کاهش می‌یابد. دلیل افزایش استحکام تسلیم اولیه بهبود اتصال بین لایه‌ها است، ولی با افزایش زمان عملیات حرارتی از کار سختی ایجاد شده حین فرایند نورد

کاهش می‌یابد. به همین خاطر درصد کاهش ضخامت به ضخامت اولیه‌ی بالا (۵۰٪) در این پژوهش، انرژی لازم برای تبلور مجدد را فراهم کرده و همچنین با افزایش فشار نورد سطح تماس واقعی را زیاد کرده و در نتیجه استحکام اتصال را افزایش می‌دهد. علت آن که نمونه‌هایی با بیش از ۵۰٪ کاهش ضخامت به ضخامت اولیه تولید نشد، پاره شدن ورق آلیاژ AA 5456 به‌عنوان لایه سوم در حین نورد سرد بود؛ همچنین برای بررسی تأثیر روش آماده‌سازی سطح می‌توان به اثر لایه ترد ایجادشده در مرحله آماده‌سازی سطح در فصل مشترک لایه‌ها اشاره کرد. در واقع با انجام عملیات سنباده‌زنی، سطح ورق‌ها کار سخت شده و لایه‌ای ترد روی ورق ایجاد می‌شود و با تشکیل این لایه‌ی ترد امکان نفوذ اتمی افزایش یافته و در نتیجه منجر به افزایش استحکام می‌گردد. در مورد دمای عملیات حرارتی، افزایش استحکام بعد از عملیات حرارتی با دمای  $400^{\circ}\text{C}$  می‌تواند مربوط به نظریه نفوذ اتمی در فصل مشترک و جنبش‌های اتمی کوتاه بردی باشد که با حرارت فعال شده‌اند. با توجه به نظریه اتصال نفوذی در صورت فراهم شدن انرژی فعال‌سازی لازم برای نفوذ، اتم‌ها می‌توانند در فصل مشترک دو فلز، از طریق سازوکارهای جانشینی، بین نشینی و جاهای خالی درهم نفوذ کنند. نفوذ و حرکت در جهات مختلف باعث می‌شود که اتم‌های موجود در موضع پیوند با سهولت بیشتری در وضعیت مناسب بلورهای و مکان‌هایی با حداقل انرژی قرار گیرند و به یک حالت پایدار برسند. با توجه به نزدیک بودن پارامتر شبکه و اندازه اتم‌های آلومینیوم و آهن در فصل مشترک لایه‌ها، تشکیل یک مرز هم‌شکل با حداقل حوزه‌های نشینی می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش استحکام باشد [۳۹].

### ۳-۳- اثر عملیات حرارتی بر ازدیاد طول نسبی ورق سه‌لایه

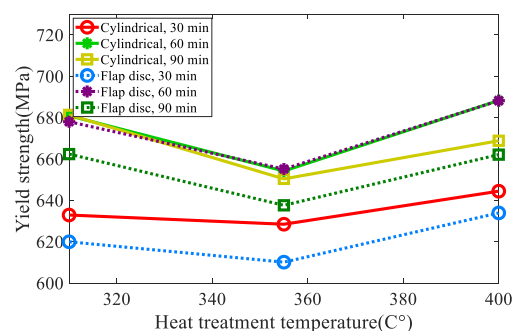
شکل ۹ نمودارهای درصد تغییرات طول نسبی ورق سه‌لایه فلزی را در اثر دماهای عملیات حرارتی در محدوده زمان‌های ۳۰ تا ۹۰ دقیقه و در یک درصد کاهش ضخامت ثابت ۵۰٪ نشان می‌دهد.

طبق این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش دمای بازپخت کاهش استحکام و افزایش درصد طول نسبی ورق سه‌لایه فلزی تا دمای  $355^{\circ}\text{C}$  ادامه دارد اما پس از آن تا

گردیدند. شکل ۸ نمودار تغییرات استحکام نمونه‌های ورق سه‌لایه فلزی را در اثر عملیات حرارتی در محدوده زمان‌های ۳۰ تا ۹۰ دقیقه و در درصد کاهش ضخامت ثابت ۵۰٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، روند نزولی استحکام تسلیم در ورق سه‌لایه فلزی از دمای  $310^{\circ}\text{C}$  شروع و تا دمای  $355^{\circ}\text{C}$  ادامه دارد. سپس روند کاهشی قطع و افزایش استحکام تا دمای  $400^{\circ}\text{C}$  رخ می‌دهد.

علت افزایش استحکام تسلیم با افزایش دمای عملیات حرارتی را می‌توان با پدیده نفوذ توجیه کرد. در صورتی که فازهای ترد در فصل مشترک لایه‌ها تشکیل نشود، نفوذ اتمی، موجب حذف فصل مشترک و یکپارچه شدن دو لایه و در نتیجه افزایش استحکام باند اتصال می‌شود [۳۸].

نکته قابل توجهی که از مقایسه نمودارهای شکل ۷ و ۸ می‌توان دریافت، افزایش مقدار استحکام تسلیم در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  و زمان ۶۰ دقیقه نسبت به دیگر وضعیت‌های عملیات حرارتی است؛ همچنین بیشترین میزان استحکام به‌دست‌آمده، در نمونه‌های ورق سه‌لایه آماده‌سازی سطحی شده توسط سنباده استوانه‌ای مشاهده می‌شود.



شکل ۸- اثر دما عملیات حرارتی بر استحکام تسلیم ورق سه‌لایه فلزی St321/AA1020/AA5456 آماده‌سازی سطحی شده با روش‌های سنباده استوانه‌ای و پرّهای

برای توجیه اثر پارامترهای بررسی‌شده در استحکام تسلیم ورق، اشاره به سازوکار تبلور مجدد می‌تواند مفید باشد. انرژی ذخیره‌شده در ماده‌ای که تحت کار سرد قرار می‌گیرد، نیروی محرکه لازم برای بازبینی و تبلور مجدد است [۲۲]. با افزایش میزان کاهش ضخامت به ضخامت اولیه، این نیرو افزایش و زمان لازم برای تبلور مجدد (در یک دمای خاص)



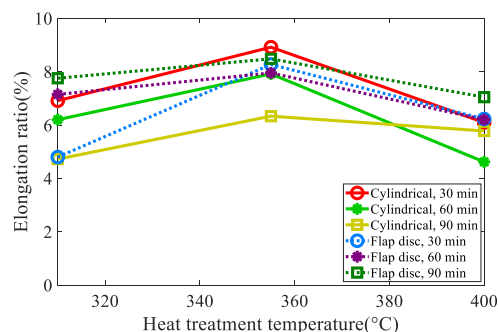
با این رخداد فاصله میان ترک‌ها کاهش و دهانه ترک‌ها باز می‌شود. سطح تماس لایه‌های فلز باهم در فصل مشترک اتصال، افزایش یافته و باعث اکستروژن فلز نرم از بین لایه‌ها می‌شود. این پدیده عامل افزایش استحکام اتصال است. آماده‌سازی سطح لایه‌ها با استفاده از ابزارهای سنباده پره‌ای و سنباده استوانه‌ای عامل ایجاد لایه ترد و شکننده در سطح می‌باشد تا شرایط برای ترک خوردن و اکستروژن شدن فلز نرم در فلز پایه مساعد شده و در نتیجه‌ی گیر کردن لایه‌ها در همدیگر و ایجاد قفل مکانیکی برقرار گردد. با مقایسه تصاویر شکل ۱۰ و مشاهده میزان بازشدگی و عمق ترک‌های به وجود آمده در فصل مشترک دو نمونه، دلیل به دست آمدن بیشترین میزان استحکام در نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده توسط سنباده استوانه‌ای توجیه می‌شود.

در شکل‌های ۱۰ ج و ۱۰ د تصاویر (SEM) از مقطع عرضی فصل مشترک اتصال لایه‌های St321/AA1020 که به ترتیب با روش سنباده استوانه‌ای و سنباده پره‌ای آماده‌سازی سطح شده‌اند نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، در تصاویر (SEM) گرفته شده از سطح مقطع عرضی ورق‌های سه‌لایه فلزی، لایه AA1020 به شکل پیوسته و بدون قطع اتصال روی لایه آلایژ St321 قرار گرفته است. با مقایسه‌ی این دو تصویر مشخص می‌شود ناهمواری‌ها در فصل مشترک عرضی در نمونه آماده‌سازی شده با روش سنباده پره‌ای کمی بیشتر است ولی باید توجه داشت که ترک‌ها و ناهمواری‌های مقطع طولی فصل مشترک هستند که در استحکام تسلیم ورق هنگام کشش در راستای نورد اهمیت دارند و مانع از جدا شدن لایه‌ها حین کشش می‌شوند.

شکل‌های ۱۰ ه، و تصاویر (SEM) گرفته شده از فصل مشترک لایه‌های AA1020/AA5456 را نشان می‌دهد. با مشاهده فصل مشترک دولایه آلومینیومی در این شکل، به سستی می‌توان خط اتصال را تشخیص داد. در اثر فرایند نورد سرد دو فلز نرم‌تر به صورت کاملاً یکنواخت در یکدیگر اکستروژن شده‌اند.

به نظر می‌آید در کاهش ضخامت به ضخامت اولیه‌ی ۵۰٪ برای هر سه ورق، دو ورق آلومینیومی به دلیل نرم‌تر بودن کاهش ضخامت بیشتری نسبت به ورق استیل تجربه کرده‌اند؛ و به همین دلیل سطح تماس واقعی دولایه افزایش یافته و در نتیجه امکان نفوذ بین لایه‌های آلومینیومی نیز افزایش یافته

دمای ۴۰۰°C افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول نسبی مشاهده می‌شود.



شکل ۹- اثر دمای عملیات حرارتی بر درصد تغییرات طول نسبی ورق سه‌لایه فلزی St 321/AA 1020/AA 5456 آماده‌سازی سطحی شده تحت روش‌های سنباده استوانه‌ای و سنباده پره‌ای

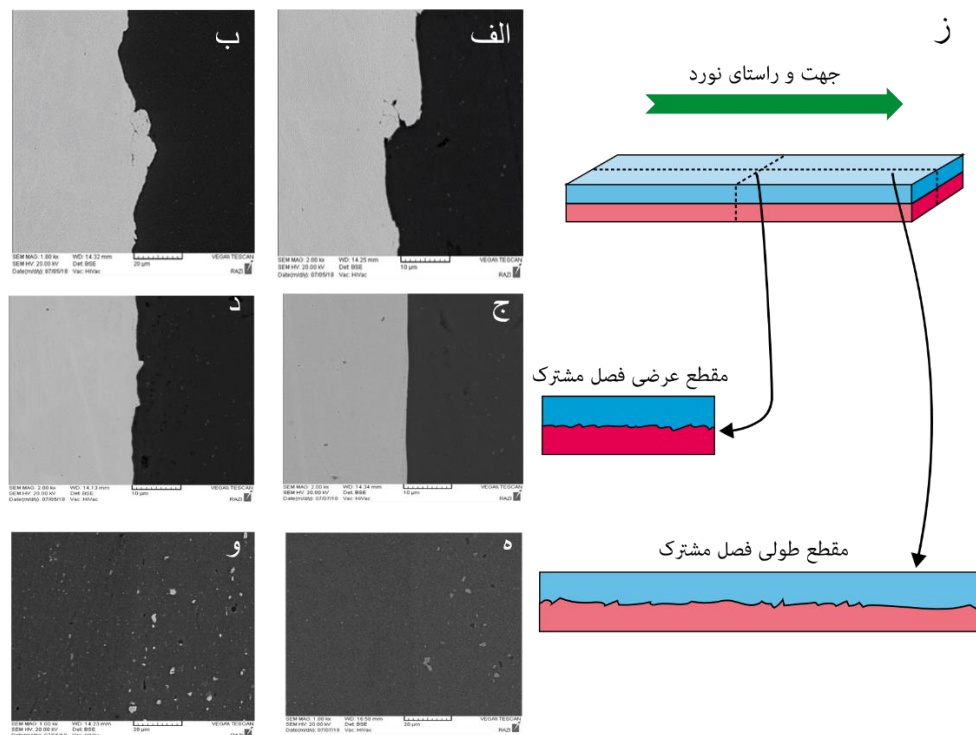
#### ۴-۳- بررسی فصل مشترک اتصال لایه‌ها

شکل ۱۰ الف، ب تصویر SEM از سطح مقطع طولی فصل مشترک اتصال بین لایه‌های St321/AA1020 و ترک‌های عمود برجهت نورد را نشان می‌دهد.

در فرایند اتصال دهی به روش نورد سرد، تغییرات سطوح و در نتیجه گسترش سطحی فلزات در بیشتر مواقع عمود برجهت نورد اتفاق افتاده و ترک یا شکست در لایه ترد سطحی در زمانی رخ می‌دهد که سطح قادر نباشد در برابر تغییرات تنش کششی ناشی از نیروی نورد در ناحیه تغییر شکل یافته مقاومت کند [۴۰]. بر طبق این شکل لایه ترد St321 ترک خورده و باعث نفوذ و پخش شدن لایه AA1020 در عمق لایه فولادی شده و در نتیجه اتصال بین لایه‌های فلزی را به وجود آورده است. به بیان دیگر فلز آلومینیوم اکستروژن شده در فصل مشترک دو فلز قفل مکانیکی ایجاد نموده است. این پدیده نشان می‌دهد به دلیل تغییر شکل راحت‌تر لایه‌ی آلومینیوم، این فلز بسیار آسان‌تر داخل شکاف‌های لایه‌ی فولادی فرورفته و عامل اتصال قوی‌تر شده است [۴۱، ۱۱].

درصد کاهش ضخامت آستانه قفل مکانیکی کمترین میزان کاهش ضخامت نسبت به ضخامت اولیه است که در آن اتصال ایجاد می‌شود. با اعمال درصد کاهش ضخامت به ضخامت اولیه ۵۰٪ ترک‌های زیادی ایجاد شده است. هم‌زمان

است که منجر به اتصال یکنواخت بین دو فلز آلومینیومی شده است.



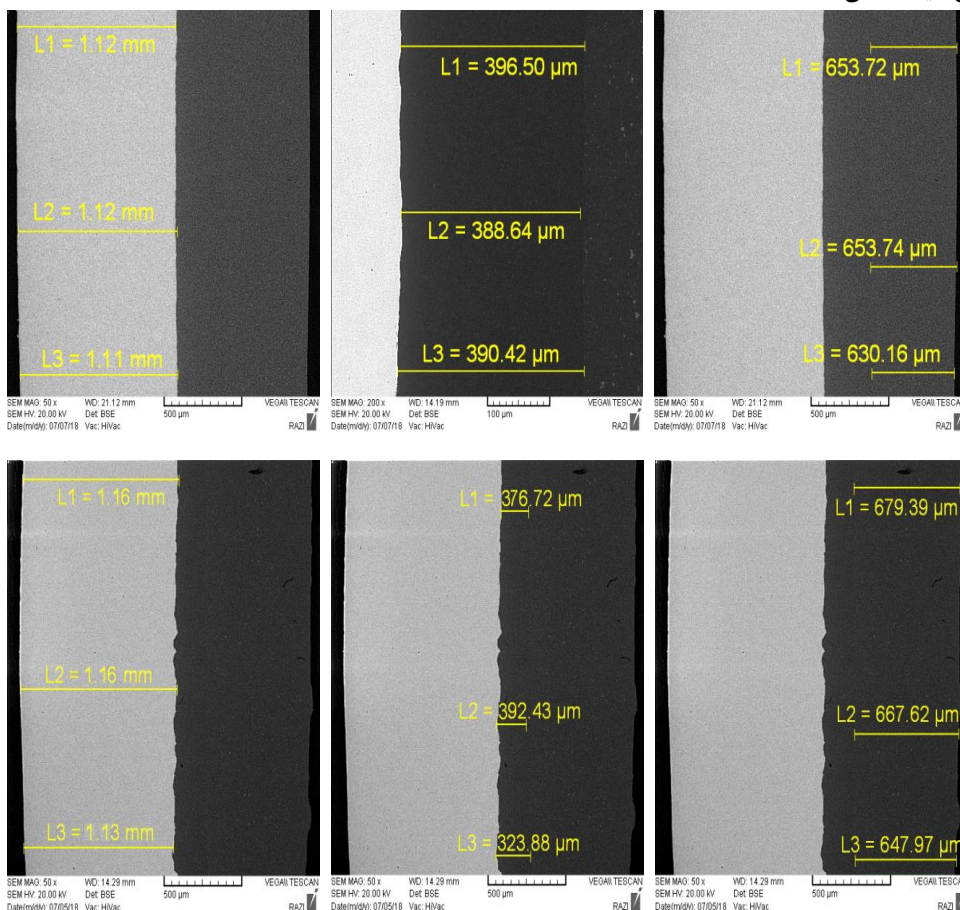
شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع طولی فصل مشترک لایه‌ها از اتصال فلز AA1020 و St321 آماده‌سازی سطحی شده تحت روش‌های الف) سنبله استوانه‌ای ب) سنبله پره‌ای و سطح مقطع عرضی آن تحت روش‌های ج) سنبله استوانه‌ای د) سنبله پره‌ای و فصل مشترک لایه‌های AA1020 و AA5456 آماده‌سازی سطحی شده تحت روش‌های ه) سنبله استوانه‌ای و) سنبله پره‌ای ز) طرح شماتیک مقاطع عرضی و طولی فصل مشترک

بررسی تغییرات ضخامت لایه‌ها در ورق سه‌لایه فلزی بیان‌گر آن است که، بیشترین میزان کاهش ضخامت بر اثر اعمال ۵۰٪ کاهش ضخامت به ضخامت اولیه، در لایه AA1020 به مقدار حدود ۶۷٪ اتفاق افتاده است. دلیل آن نیز خواص مکانیکی و نرمی فلز AA1020 می‌باشد. همچنین کمترین میزان کاهش ضخامت مربوط به لایه فولاد St321 با مقدار حدود ۴۳٪ می‌باشد. تغییرات ضخامت در لایه آلایز AA5456 نیز مقدار ۵۵٪ را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج کاهش ضخامت در هر لایه، نقش لایه AA1020 با خواص مکانیکی مطلوب به‌عنوان لایه واسط در ایجاد اتصال بهتر مشخص می‌گردد. با افزایش قابلیت اکستروژن شدن و فرورفتن لایه آلومینیم AA1020 در ترک‌های به وجود آمده در دولایه دیگر، شرایط برای ایجاد مکانیزم قفل

### ۳-۵- توزیع ضخامت لایه‌ها بعد از نورد

پس از انجام عملیات آماده‌سازی فیزیکی و شیمیایی سطح ورق‌ها، مجموع ضخامت اولیه‌ی ورق سه‌لایه پیش از نورد ۴/۲mm بوده است. بعد از نورد ورق، ضخامت آن به ۵۰٪ ضخامت اولیه رسیده و ضخامت ورق سه‌لایه به‌دست‌آمده  $1.1 \pm 0.2$  mm در نمونه‌های مختلف بوده است. اما با توجه به اینکه خواص مکانیکی سه ورق با یکدیگر متفاوت است درصد کاهش ضخامت در این سه ورق برابر نبوده و در ورق‌های آلومینیومی این درصد کاهش ضخامت بیشتر از ورق استیل بوده است. در شکل ۱۱ توزیع ضخامت ورق سه‌لایه آماده‌سازی شده با سنبله صفحه‌ای و سنبله استوانه‌ای بعد از نورد نشان داده شده است.

مکانیکی فراهم شده و در نتیجه اتصال همراه با استحکام بین سطوح تماس لایه‌ها اتفاق افتاده است.



شکل ۱۱- مقادیر توزیع ضخامت ورق سه لایه فلزی St321/AA1020/AA5456 آماده سازی سطحی شده تحت روش‌های (الف) سنباده استوانه‌ای (ب) سنباده پره‌ای

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش تجربی، تأثیر روش آماده‌سازی سطح ورق‌ها و همچنین زمان و دمای بازپخت ورق سه لایه با جنس St321/AA1020/AA5456 روی سختی سطح و استحکام تسلیم ورق مرکب تولیدشده، سنجیده شد. برای این کار در آماده‌سازی سطح از دو روش سنباده‌زنی شامل سنباده پره‌ای و سنباده استوانه‌ای استفاده شده و سه سطح دما ۳۱۰، ۳۵۵ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین سه مدت‌زمان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه برای عملیات حرارتی انتخاب گردید. در مجموع ۱۸ نمونه ورق تولید شد و روی این نمونه‌ها

آزمون‌های سختی سنجی و کشش طولی انجام گرفت. نتایج این آزمون‌ها و همچنین تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه‌ها نشان می‌دهد که:

- سختی لایه AA5456 نسبت به سختی اولیه آن ۴۷٪ افزایش یافته است.
- سختی لایه St321 نسبت به سختی اولیه آن ۱۲۵٪ افزایش یافته است.
- در دمای ثابت عملیات حرارتی، با افزایش زمان عملیات حرارتی ابتدا استحکام تسلیم افزایش و با ادامه این روند استحکام تسلیم کاهش یافته است همچنین در زمان ثابت

- titanium/AISI 304 stainless steel. Mater Des, 30(3), 459-468
- [9] Movahedi, M., Madaah-Hosseini, H., & Kokabi, A. (2008). The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets. Mater Sci Eng , A, 487(1-2), 417-423 .
- [10] Kim, M., Lee, K., Han, S., & Hong, S .(2021) . Interface strengthening of a roll-bonded two-ply Al/Cu sheet by short annealing. Mater Charact, 174, 111021 .
- [11] Baruj, H. D., Shadkam, A., & Kazeminezhad, M. (2020). Effect of severe plastic deformation on evolution of intermetallic layer and mechanical properties of cold roll bonded Al-Steel bilayer sheets. J Mater Res Technol, 9(5), 11497-11508 .
- [12] Manesh, H. D., & Shahabi, H. S. (2009). Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips. J Alloys Compd, 476(1-2), 292-299 .
- [13] Wang, C.-y., Jiang, Y.-b., Xie, J.-x., Sheng, X., Zhou, D.-j., & Zhang, X.-j. (2017). Formation mechanism and control of aluminum layer thickness fluctuation in embedded aluminum-steel composite sheet produced by cold roll bonding process .Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 27(5), 1011-1018 .
- [14] Findik, F. (2011). Recent developments in explosive welding. Mater Des, 32(3), 1081-1093 .
- [15] Chou, I.-N., & Hung, C. (1999). The finite-element study on extrusion of powder/solid composite clad rods. J Mater Process Technol, 96(1-3), 124-132 .
- [16] Sharifitabar, M., Halvae, A., & Khorshahian, S. (2011). Microstructure and mechanical properties of resistance upset butt welded 304 austenitic stainless steel joints. Mater Des, 32(7), 3854-3864 .
- [17] Brickstad, B., & Josefson, B. (1998). A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. Int. J Press Vessels Pip, 75(1), 11-25 .
- [18] Xiao, H., Qi, Z., Yu, C., & Xu, C. (2017). Preparation and properties for Ti/Al clad plates generated by differential temperature rolling. J Mater Process Technol, 249, 285-290 .
- [19] Nie, J., Wang, F., Chen, Y., Mao, Q., Yang, H., Song, Z., Liu, X., & Zhao, Y. (2019). Microstructure and corrosion behavior of Al-TiB<sub>2</sub>/TiC composites processed by hot rolling. Results Phys, 14, 102471 .
- [20] Ray, S. (2016). Principles and applications of metal rolling. Cambridge University Press .
- [21] Forster, J. A., Jha, S., & Amatruda, A. (1993). The processing and evaluation of clad metals. Jom , 6(45)35-38.
- عملیات حرارتی با افزایش دما استحکام تسلیم ابتدا کاهش و مجدداً افزایش یافته است.
- (۴) در آماده‌سازی فیزیکی سطح ورق‌ها سنباده استوانه‌ای نسبت به سنباده پره‌ای عملکرد بهتری در افزایش استحکام تسلیم ورق داشته است.
- (۵) بیشترین افزایش مقدار استحکام تسلیم در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰°C و زمان ۶۰ دقیقه و آماده‌سازی شده توسط سنباده استوانه‌ای مشاهده شده است.
- (۶) در تصاویر SEM گرفته‌شده از سطح مقطع نمونه‌ها مشاهده می‌شود، لایه‌ی St321 ترک‌خورده و عامل نفوذ فلز آلومینیوم در ترک‌های لایه فولادی شده و با ایجاد قفل مکانیکی اتصال بین لایه‌های فلزی را به وجود آورده است.

#### مراجع

- [1] Sheng, L., Yang, F., Xi, T., Lai, C., & Ye, H. (2011). Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling. Compos B Eng, 42(6), 1468-1473 .
- [2] Hossein, O., Abbasi, M., & Razavi, S. H. (2012). Evaluation of diffusion and phase transformation at Ag/Al bimetal produced by cold roll welding. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22(2), 312-317 .
- [3] Li, X., Zu, G., & Wang, P. (2013). Effect of strain rate on tensile performance of Al/Cu/Al laminated composites produced by asymmetrical roll bonding. Mater Sci Eng , A, 575, 61-64 .
- [4] Jamaati, R., & Toroghinejad, M. R. (2010). Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process. Mater Des, 31(9), 4508-4513 .
- [5] Kim, I.-K., & Hong, S. I. (2013). Effect of component layer thickness on the bending behaviors of roll-bonded tri-layered Mg/Al/STS clad composites. Mater Des, 49, 935-944 .
- [6] Kim, J.-K., Huh, M.-Y., Lee, J.-C., Jee, K.-K., & Engler, O. (2004). Evolution of strain states and textures during roll-cladding in STS/Al/STS sheets. J Mater Sci, 39(16), 5371-5374 .
- [7] Lee, K. S., Yoon, D. H., Kim, H. K., Kwon, Y.-N., & Lee, Y.-S. (2012). Effect of annealing on the interface microstructure and mechanical properties of a STS-Al-Mg 3-ply clad sheet. Mater Sci Eng , A, 556, 319-330 .
- [8] Mousavi, S. A., & Sartangi, P. F. (2009). Experimental investigation of explosive welding of cp-

- [33] Shabani, A., Toroghinejad, M. R., & Bagheri, A. (2018). Effects of intermediate Ni layer on mechanical properties of Al-Cu layered composites fabricated through cold roll bonding. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, 25(5), 573-583 .
- [34] Yang, X., Weng, H., & Tang, C.-l. (2018). Interfacial Bonding Mechanism Ofaluminium and Steel Composites. *Adv. Compos. Lett*, 27(2), 096369351802700203.
- [35] Beygi, R., & Kazeminezhad, M. (2010). The effects of annealing phenomena on the energy absorption of roll-bonded Al-steel sheets during wedge tearing. *Mater Sci Eng , A*, 527(27-28), 7329-7333 .
- [36] Eizadjou, M., Manesh, H. D & ,Janghorban, K. (2008). Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips. *Mater Des*, 29(4), 909-913 .
- [37] Singh, R. (2016). Chapter 12 - Heat Treatment of Steels. In R. Singh (Ed.), *Applied Welding Engineering (Second Edition)* (pp. 111-124). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804176-5.00012-8>
- [38] Lo, I.-H., & Tsai, W.-T. (2003). Effect of heat treatment on the precipitation and pitting corrosion behavior of 347 SS weld overlay. *Materials Science and Engineering: A*, 355(1-2), 137-143 .
- [39] Syarif, J., Badawy, K., & Hussien, H. A. (2021). Atomistic simulation of the diffusion behavior in Al-Fe. *Nucl Mater Energy*, 29, 101073 .
- [40] Parsa, M. H., Yamaguchi, K., & Takakura, N. (2001). Redrawing analysis of aluminum-stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments. *Int J Mech Sci*, 43(10), 2331-2347 .
- [41] Akramifard, H., Mirzadeh, H., & Parsa, M. (2014). Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties. *Mater Sci Eng , A*, 613, 232-239 .
- [22] Li, L., Nagai, K., & Yin, F. (2008). Progress in cold roll bonding of metals. *Sci Technol Adv Mater* .
- [23] Manesh, D., & Taheri, K. (2005). An investigation of deformation behavior and bonding strength of bimetal strip during rolling. *Mechanics of Materials*, 37(5), 531-542 .
- [24] Hwang, Y.-M., Chen, T.-H., & Hsu, H.-H. (1996). Analysis of asymmetrical clad sheet rolling by stream function method. *Int J Mech Sci*, 38(4), 443-460 .
- [25] Tzou, G.-Y., & Huang, M.-N. (2003). Analytical modified model of the cold bond rolling of unbounded double-layers sheet considering hybrid friction. *J Mater Process Technol*, 140(1-3), 622-627 .
- [26] Nie, H., Liang, W., Chen, H., Zheng, L., Chi, C., & Li, X. (2018). Effect of annealing on the microstructures and mechanical properties of Al/Mg/Al laminates. *Mater Sci Eng , A*, 732, 6-13 .
- [27] Wang, Y., Song, R., Yanagimoto, J., & Li, H. (2019). Effect of heat treatment on bonding mechanism and mechanical properties of high strength Cu/Al/Cu clad composite. *J Alloys Compd*, 801, 573-580 .
- [28] Poddar, V., & Rathod, M. (2021). Evaluation of mechanical properties of cold roll bonded mild steel and aluminum. *Mater Today Proc* .
- [29] Amanollahi, A., Ebrahimzadeh, I., Raeissi, M., & Saeidi, N. (2021). Laminated steel/aluminum composites: Improvement of mechanical properties by annealing treatment. *Mater Today Commun*, 29, 102866 .
- [30] Toutanji, H., & Ortiz, G. (2001). The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members. *Compos. Struct*, 53(4), 457-462 .
- [31] Abedi, R., & Akbarzadeh, A. (2015). Bond strength and mechanical properties of three-layered St/AZ31/St composite fabricated by roll bonding. *Mater Des*, 88, 880-888 .
- [32] Gao, C., Li, L., Chen, X., Zhou, D., & Tang, C. (2016). The effect of surface preparation on the bond strength of Al-St strips in CRB process. *Mater Des*, 107, 205-211 .