

## بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر خواص ریزساختاری ورق سه لایه آلومینیوم منیزیم - آلومینیوم خالص - فولاد زنگ نزن

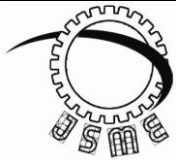
داوود میراحمدی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل غلامزاده<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: davood.mecanic87@yahoo.com

واژه‌های کلیدی	چکیده
اتصال نوردی سرد، استحکام پیوند، ورق سه لایه آلومینیوم منیزیم / آلومینیوم خالص / فولاد زنگ نزن.	فلزات روکشی، مواد فلزی دو یا چند لایه ای می باشند. امروزه فلزات روکشی به طور گسترده در صنعت کاربرد دارند. این ورق ها راه حل های موثری در عملکرد یا صرفه جویی هزینه و یا هر دو ایجاد می کنند. عملکرد فلزات روکشی بنا به کاربردهایشان به کاربردهای ساختمانی، تنظیمات انبساط حرارتی، کنترل های ترمومکانیکی (ترموستات)، الکتریکی، مغناطیسی، مقاوم به خوردگی، اتصال دهی و تزیینی تقسیم می شود. در هر گروه عملکردی، ممکن است چندین سیستم فلز روکشی حضور داشته باشد.
تاریخ ارسال: ۹۴/۱۰/۰۳	در پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند اتصال نوردی، ورق سه لایه آلومینیوم منیزیم - آلومینیوم خالص - فولاد زنگ نزن <sup>۳</sup> تولید شد. استحکام پیوند در حالت های مختلف با استفاده از آزمون کشش بررسی شد و با تحلیل تصاویر میکروسکوپ نوری استریو و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، کیفیت پیوند مورد ارزیابی قرار گرفت. از سطح مقطع پیوند در شرایط مختلف نمونه های نورد شده و آنیل شده عکس برداری گردید. به منظور تعیین بهترین شرایط تولید ورق چند لایه، اثر پارامترهای فرآیند اتصال نوردی مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات خواص مکانیکی در حالت های مختلف توسط آزمون کشش طبق استاندارد مجاز ASTM E8M انجام گردید. بررسی ها نشان داد که با آنیل نمونه ها در دماهای بالای ۳۷۵ درجه سانتیگراد برای آلومینیوم، استحکام پیوند افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه های نورد شده داشته است.
تاریخ بازنگری: ۹۴/۰۲/۱۳	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۰	

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### Effect of heat treatment on microstructural properties of three-layer sheet Aluminum Magnesium - Aluminum - Stainless Steel

davood mirahmadi<sup>1,\*</sup>, Abolfazl golamzade<sup>2</sup>

\*Corresponding Author: [davood.mecanic87@yahoo.com](mailto:davood.mecanic87@yahoo.com)

---

#### Abstract:

Metal coating, metal materials are of two or more layers. The coating metals are widely used in industry. These sheets or saving performance and cost effective solution or both the user. Performance coating metals according to usage in structural applications, settings thermal expansion of the thermo-mechanical control (thermostat), electrical, magnetic, corrosion resistant, flowering and decorative connection is divided. In each action, you may have attended several coating metal system.

In this study, using the process connectors, three-layer aluminum sheet net aluminum, stainless steel was produced Magnesium-. Examples of cross-links in different situations rolled and annealed photos were taken. In order to determine the best conditions for the production of multi-layer sheet, the effect of process parameters were evaluated connectors. Changes in different mechanical properties by tensile test were performed according to ASTM E8M allowed. The survey showed that the samples annealed at temperatures above 375°C for aluminum, substantial increase bond strength of the samples has been rolled.

---

---

#### Key words:

Connect cold rolling,  
bond strength,  
three-layer sheet Aluminum,  
Magnesium,  
Aluminum,  
Stainless Steel.

---

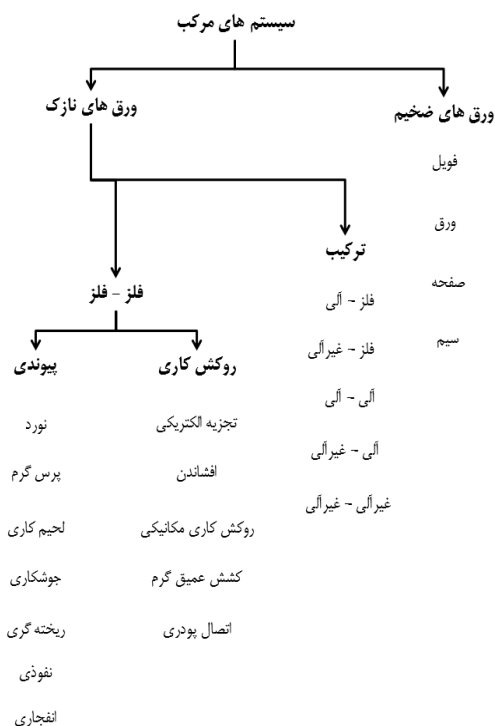
---

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Tehran Markazi Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Tehran Markazi Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

## ۱- مقدمه

این پژوهش بر مبنای تولید ورق سه لایه آلومینیوم منیزیم- آلومینیوم خالص- فولاد زنگ نزن با بهترین خواص مکانیکی و استحکام پیوند، هدف گذاری شد. در پژوهش حاضر امکان پذیری تولید ورق سه لایه با استفاده از فرآیند اتصال نوردی بررسی شده و خواص ورق‌ها مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته‌اند. بدین منظور اثر پارامترهای فرآیند، بر استحکام فصل مشترک بررسی شده و مقادیر بهینه جهت تولید ورق‌های سه لایه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دمای آنیل پایانی به عنوان پارامتر تاثیرگذار بر خواص ورق‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، فلزات روکش دار به صورت سیستم های مرکب لایه ای اتصال فلز- فلز طبقه بندی شده- اند که توسط چندین فلز قابل ساخت می باشند. همچنین این مواد، فلزات ساندریجی یا فلزات چند لایه ای نامیده می شوند. شکل (۱) طبقه بندی فلزات روکشی به صورت سیستم های کامپوزیتی لایه ای فلز- فلز را نشان می دهد.



شکل (۱) طبقه بندی فلزات روکشی به صورت سیستم های کامپوزیتی لایه ای فلز- فلز.

امروزه با پیشرفت روز افزون صنایع مختلف هسته‌ای، هوا - فضا، الکترونیک و شیمیایی، از موادی با قابلیت‌ها و ویژگی‌های خاص از جمله خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی ویژه استفاده می‌شود [۱]. برآوردن این نیازها با استفاده از یک ماده امکان پذیر نیست، بنابراین مواد کامپوزیتی چند لایه فلزی در سال‌های اخیر در صنعت مورد توجه خاصی قرار گرفته است. امروزه ورق‌های چند لایه (ورق‌های ساندریجی) با خواص مختلفی مانند: هدایت الکتریکی، مقاومت به خوردگی، استحکام بالا و غیره در صنایع مختلف کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند [۲، ۳].

در تولید ورق‌های چندلایه، فرآیند نورد با بیشترین بهره‌وری، اقتصادی‌ترین روش در مقایسه با دیگر فرآیندهای تولید از جمله پوشش‌دهی انفجاری<sup>۱</sup> و جوش نفوذی<sup>۲</sup> می‌باشد [۴]. ایجاد پیوند از طریق نورد بین ورق‌ها در مقایسه با مکانیزم‌های تغییر شکل دمای بالا دارای مزیت‌هایی از جمله: هزینه کمتر، کیفیت سطوح بالاتر و همچنین جلوگیری از وقوع تغییرات فازی و میکروساختاری ناخواسته در دمای بالا می‌باشد [۵]. در روش اتصال نوردی، فلزات همجنس و غیرهمجنس توسط تغییر شکل اعمالی در نورد به یکدیگر اتصال یافته و کامپوزیتی با خواص چندگانه و منحصر به فرد تولید می‌شود. فشار نورد پیوند متالورژیکی بین اجزای سازنده در ساختار لایه‌ای ایجاد می‌کند و جوش متالورژیکی بوجود آمده سبب پیوستگی فلزی در فصل مشترک می‌شود [۶، ۳].

ورق دو و سه لایه آلومینیوم- فولاد زنگ‌نزن نه تنها به منظور کاهش هزینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ بلکه دارای مزایای مکانیکی و حرارتی ناشی از خواص ذاتی آلومینیوم و فولاد زنگ‌نزن می‌باشد. علاوه بر افزایش استحکام، کاهش وزن، شکل پذیری مناسب، کاهش انبساط حرارتی عالی نیز از مزایای دیگر آن است [۷].

<sup>1</sup> Explosive Cladding

<sup>2</sup> Diffusion Welding

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزات آلیاژی مورد استفاده در این پژوهش.

عنصر آلیاژی	ترکیب شیمیایی (wt%)			
فولاد زنگ نزن	کربن	نیکل	کروم	سیلیسیم
	۰/۰۸	۹/۵	۱۸/۲	۰/۹۵
فولاد زنگ نزن	منگنز			
	۱/۸			
آلومینیوم خالص	آهن		سیلیسیوم	مس
	۰/۳		۰/۳	۰/۰۵
آلومینیوم منیزیم	منیزیم	آهن	سیلیسیوم	مس
	۶/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۰۵
آلومینیوم منیزیم	روی			
	۰/۲۱			

آزمون سختی ورق های موجود با نیروی ۲۰ کیلوگرم بر نیوتن برای ورق های آلومینیوم منیزیم و فولاد زنگ نزن و نیروی یک کیلوگرم بر نیوتن برای ورق آلومینیوم خالص انجام شد. همچنین خواص مکانیکی و نتایج آزمون سختی بر حسب واحد ویکرز این آلیاژهای فلزی، در جدول (۲) آورده شده است.

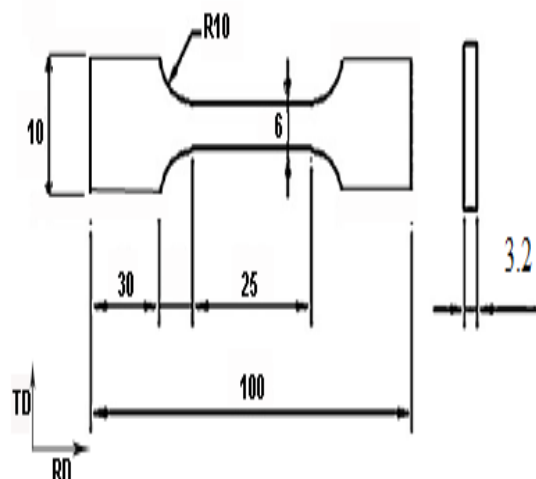
جدول (۲) خواص مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده در این پژوهش.

فلزات آلیاژی	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش شکست (%)	سختی (HV)
آلومینیوم منیزیم	۱۶۰	۳۲۰	۲۴	۸۵ ± ۲
آلومینیوم خالص	۳۴	۹۰	۴۵	۱۶ ± ۲
فولاد زنگ نزن	۲۰۵	۵۲۰	۴۰	۱۴۸ ± ۲

در ابتدا ورق ها در محلول شیمیایی استون چربی زدایی شدند. آماده سازی سطحی به وسیله برس های چتری به منظور افزایش زبری سطحی صورت گرفت و به منظور جلوگیری از حرکت ورق ها در زیر غلتک های نورد، از پرچ های آلومینیومی در گوشه های ورق های تولیدی

## ۲- شرح روش های حل

در پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند اتصال نوردی، ورق های سه لایه آلومینیوم منیزیم- آلومینیوم خالص- فولاد زنگ نزن (AlMg6/Al/STS) تولید شد. استحکام پیوند در حالت های مختلف، با استفاده از آزمون کشش بررسی شد و با تحلیل تصاویر میکروسکوپ نوری استریو و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، کیفیت پیوند مورد ارزیابی قرار گرفت. از تصاویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع پیوند در شرایط مختلف نمونه های نورد شده و آنبیل شده عکس برداری گردید. در پایان تغییرات خواص مکانیکی در حالت های مختلف توسط آزمون کشش طبق استاندارد مجاز ASTM E8M با طول گیج  $25 \pm 0.1$  میلی متر بررسی شد. شکل (۲) طرح کلی آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM E8(M) را نشان می دهد.



شکل (۲) طرح کلی آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 (M).

ضخامت نهایی برای این ورق  $3/2$  میلی متر در نظر گرفته شد. نمونه های تولیدی با استفاده از دستگاه CNC فرز، تراش داده شد و برای حذف تاثیر مضر دماهای مختلف آماده سازی از مواد خنک کننده استفاده گردید. مقادیر ترکیب شیمیایی فلزات آلیاژی بر حسب درصد وزنی (wt%) در جدول (۱) بیان شده است.

### ۳- نتایج

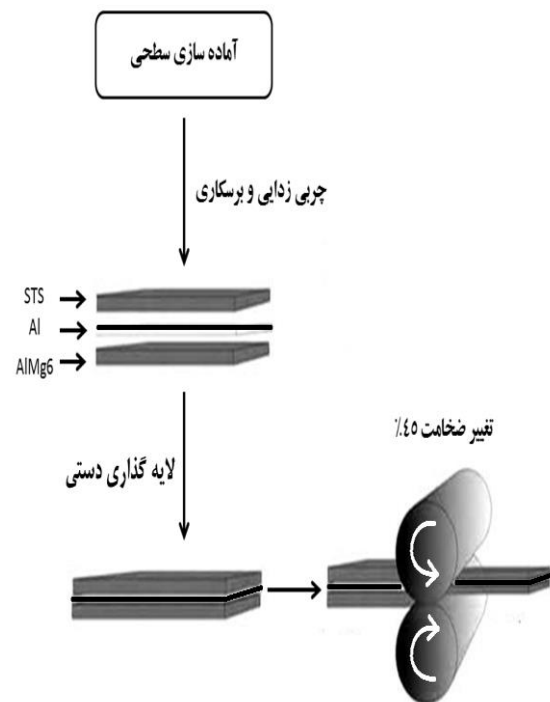
در فرآیند اتصال نوردی، سیلان فلز و گسترش سطحی فلزات، اغلب عمود بر جهت نورد صورت می‌گیرد و شکست زمانی اتفاق می‌افتد که سطح نتواند در مقابل تنش کششی منطقه‌ی تغییر شکل مقاومت کند. همانطور که مشاهده می‌شود (شکل ۴)، شکست عمود بر جهت نورد اتفاق افتاده است [۸] و لایه ترد میانی ترک خورده و باعث نفوذ فلز آلومینیوم در عمق لایه فولادی شده و اتصال را به وجود آورده است (فصل مکانیکی). (شکل ۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه های تولید شده در ۶ دما با تغییر سطح مقطع ۴۵٪ را نشان می‌دهد.



شکل (۴) تصویر فصل مشترک اتصال و ایجاد ترک های عمود بر جهت نورد.

استفاده شد که در نهایت با تغییر سطح مقطع ۴۵٪ تمامی نمونه ها تولید شدند. سپس برای ۶۰ دقیقه، در کوره الکتریکی در دماهای مختلف حرارت دهی شدند. حرارت دهی در ۶ دما از ۲۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد با فواصل ۵۰ درجه ای (۲۰۰-۲۵۰-...-۴۵۰ درجه سانتیگراد) انجام گرفت. تمامی نمونه های تولیدی بعد از عملیات حرارتی بوسیله آزمون کشش مورد ارزیابی قرار گرفتند که برای کاهش خطای احتمالی در طول آزمون، دو نمونه برای هر دما تحت کشش قرار گرفت.

جهت بررسی خواص مکانیکی ورق های تولید شده نیز نمونه های آنبیل شده و شاهد برای آزمون کشش توسط دستگاه Hounsfield H10ks در دمای محیط و سرعت اعمال بار یک میلی متر بر دقیقه، در راستای جهت نورد کشیده شدند تا در پایان با مقایسه نمودارهای بدست آمده، تغییرات ریزساختاری و خواص کششی ورق سه لایه در شرایط مختلف آزمون (۶ دمای آنبیل و درصد کاهش ضخامت ۴۵٪) مورد بررسی قرار گیرند. طرح کلی عملیات نورد انجام شده در شکل (۳) نمایان است.

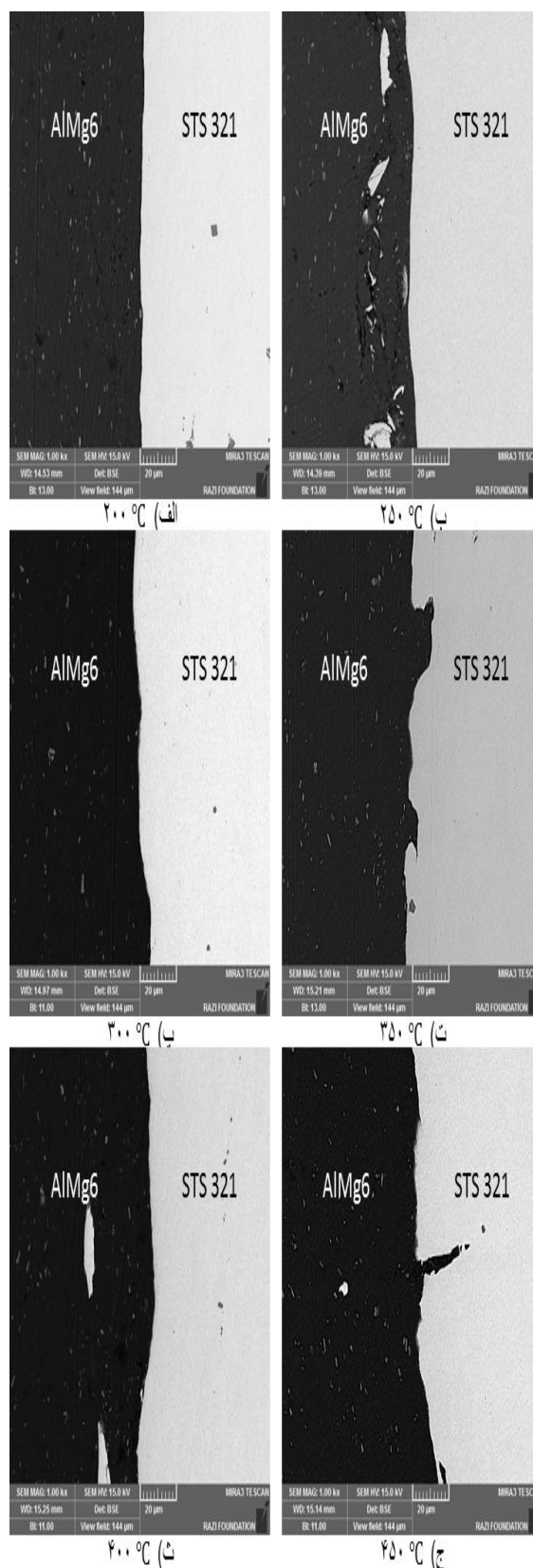


شکل (۳) طرح کلی عملیات نورد انجام شده در این پژوهش.

## ۳-۱ مقایسه استحکام باند در شرایط مختلف

بدلیل افت ناگهانی نیرو در دستگاه، کشش نمونه ها تا هنگام شکسته شدن لایه آلومینیومی ادامه یافت. همچنین نمودارهای کشش برای هر دما تا قبل از شکست تسمه آلومینیومی رسم گردیدند. تغییر شکل آستانه کمترین میزان تغییر شکل است که در آن اتصال ایجاد می شود. با مراجعه به آنچه برای بیان مکانیزم اتصال در قسمت قبل توضیح داده شد. با اعمال درصد تغییر شکل ۴۵٪ میزان ترک های تشکیل شده در واحد سطح بیشتر شده است. از طرف دیگر باز شدگی عرض دهانه ترک ها (شکل ۵ ج) نیز افزایش یافته که این پدیده منجر به تسهیل بیرون انداخته شدن فلز تمیز از لایه های زیرین می شد که منجر به اتصال قوی تر می شد چون سطح اتصال به این طریق افزایش پیدا می کرد. برای نمونه های مذکور هم از برسکاری سطحی استفاده شد که زبری ایجاد شده در سطح امکان گیر کردن لایه ها در همدیگر هنگام نورد را فراهم کند.

همزمان با این پدیده با کاهش نسبی فاصله بین ترک ها و افزایش باز شدگی دهانه ترک ها، بیرون انداخته شدن فلز تمیز از بین لایه ها و در تماس قرار گرفتن با هم از دو لایه در فصل مشترک اتصال، افزایش یافته و نهایتاً منجر به افزایش استحکام اتصال شده است. شکل (۶) مبین آن است که شکست در فصل مشترک و افزایش دمای حرارت دهی نمونه نسبت به حالت خام باعث افزایش استحکام باند شده به طوری که فلز آلومینیوم بیرون انداخته شده در درون ترک های لایه فولادی باقی مانده و پدیده قفل مکانیکی صورت گرفته است. این اتفاق موید این مطلب است که چون تغییر شکل آلومینیوم ساده تر است، این فلز خیلی آسان تر در عمق بیشتر ترک های لایه فولادی فرو رفته و اتصال قوی تری هم حاصل می شود. محل ذکر شده در شکل (۶) با علامت فلش نشان داده شده است.



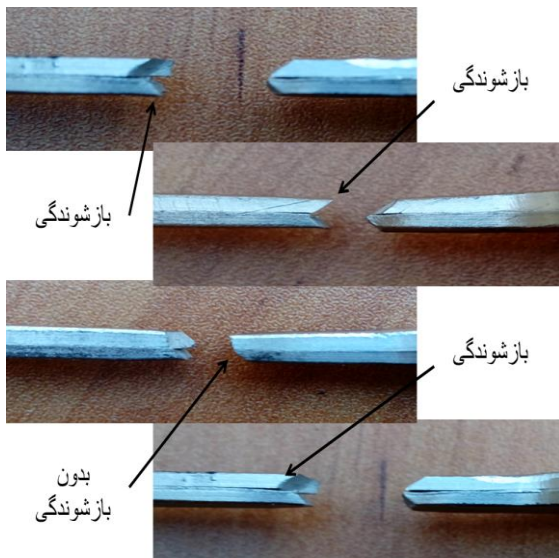
شکل (۵) نمونه های تولید شده ورق سه لایه و آنیل در دماهای:

(الف) ۲۰۰°C - (ب) ۲۵۰°C - (پ) ۳۰۰°C - (ت) ۳۵۰°C

(ث) ۴۰۰°C - (ج) ۴۵۰°C

<sup>1</sup> Extrude

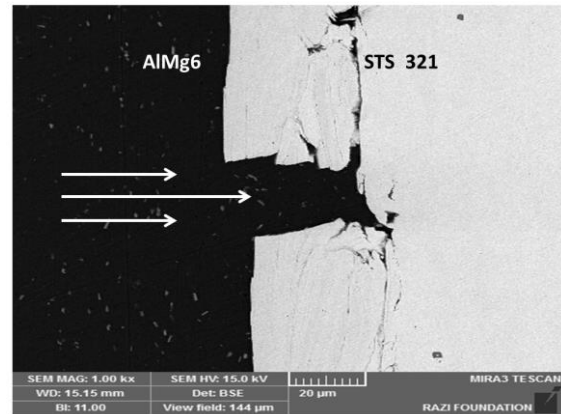




شکل (۷) نمونه ورق سه لایه بعد از تست کشش و شکست لایه ها بدون باز شونانگی.

### ۲-۳ تاثیر دمای آنیل بر استحکام اتصال

به منظور بررسی اثر افزایش دمای آنیل بر استحکام اتصال، نمودارهای استحکام اتصال بر حسب دمای آنیل در یک درصد تغییرشکل ثابت رسم گردید. با مقایسه نمودارهای رسم شده در شکل (۸) به وضوح میزان افزایش و کاهش استحکام اتصال در هر درصد تغییرشکل مشخص شده است. نتایج مبین آن است که استحکام اتصال با افزایش دمای آنیل تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد. در بررسی های میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، تصاویر (۵) مشخص شد که برای نمونه های آنیل شده در دماهای بالای ۳۰۰ درجه سانتیگراد، بیشترین مقدار بیرون انداخته شدن متقابل فلزات در یکدیگر اتفاق افتاده بود. زمانی که هر دو فلز در ترک های یکدیگر بیرون انداخته شدند، شرایطی ایجاد گردید که استحکام اتصال افزایش پیدا کند. از طرفی مطابق با آنچه در نظریه قفل مکانیکی و اختلاف تنش تسلیم بیان می شود، در شرایط قفل شدن مکانیکی یکسان لایه ها حین نورد، عامل موثر در افزایش استحکام اتصال، میزان تغییرشکل لایه ها تا ۴۵٪ کاهش سطح مقطع بود که با توجه به اختلاف میزان تغییرشکل لایه آلومینیومی و فولادی نسبت به هم، شکست لایه ترد فصل



شکل (۶) تغییر شکل راحت تر فلز آلومینیوم منیزیم و بیرون انداخته شدن در فولاد زنگ نزن.

بر مبنای نظریه فیلم سطحی، اگر دو سطح فلزی تمیز در تماس نزدیک با یکدیگر قرار بگیرند، بین آنها اتصال ایجاد می شود. اما بطور معمول، سطح فلزات پوشیده از لایه های مختلفی است که مزاحم ایجاد اتصال می باشند [۹].

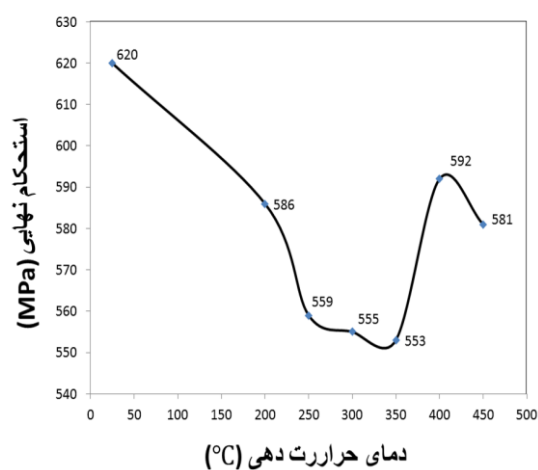
اکسید شدن لایه ها در درصد های پایین تر کاهش سطح مقطع، به عنوان سدی در مقابل برقراری اتصال عمل می کند و باعث کاهش استحکام اتصال می شود. اما با اعمال تغییرشکل ۴۵٪، میزان باز شونانگی عرض دهانه ترک ها نیز افزایش یافته و به دلیل تغییرشکل آسان تر آلومینیوم و همچنین فراهم بودن انرژی فعال سازی برای عبور راحت تر از سد انرژی، اتصال برقرار شد و باعث افزایش استحکام می شود. در کاهش سطح مقطع ۴۵٪، نمونه های سه لایه، حین آزمایش کشش از لایه آلومینیومی بدون جدایش شکسته شدند (شکل (۷)). این مطلب نشان دهنده بازده ۱۰۰٪ در میزان تغییر شکل ۴۵٪ برای نمونه های تولیدی بود. شکل (۷) نمونه ورق های سه لایه تولید شده بعد از آزمون کشش را نشان می دهد.

همانطور که در شکل مشاهده می گردد، با افزایش دمای آنیل، کاهش استحکام و افزایش ازدیاد طول نسبی ورق سه لایه تا  $350^{\circ}\text{C}$  ادامه دارد. اما در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  تا  $400^{\circ}\text{C}$ ، افزایش چشم گیر استحکام و کاهش ازدیاد طول نسبی را شاهد هستیم. از دمای  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $450^{\circ}\text{C}$  نیز روند کاهش استحکام و ازدیاد طول نیز ادامه دارد. تغییرات استحکام کششی ورق سه لایه در آزمون کشش در گستره دمای محیط تا دمای  $450^{\circ}\text{C}$  در نمودارهای (۸) و (۹) نشان داده شده است. این منحنی ها که از اطلاعات بدست آمده از آزمون کشش (جدول (۳)) استخراج شده است، روند نزولی استحکام کششی ورق سه لایه تا دمای  $350^{\circ}\text{C}$  و سپس افزایش در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  و کاهش دوباره آن را در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  نشان می دهد. با توجه به جدول (۳)، استحکام کششی نمونه شاهد  $45\%$  کاهش سطح مقطع داده شده، در حدود  $620\text{ MPa}$  می باشد که پس از  $60$  دقیقه حرارت دهی در  $450^{\circ}\text{C}$  به  $581\text{ MPa}$  کاهش یافته است. همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می شود، ازدیاد طول نسبی نمونه  $45\%$  تغییر شکل یافته با افزایش دمای آنیل تا  $250^{\circ}\text{C}$  یک روند صعودی قابل ملاحظه ای را طی می کند اما با افزایش دمای آنیل به  $300^{\circ}\text{C}$  کاهش می یابد و در ادامه نیز با افزایش دمای آنیل به  $400^{\circ}\text{C}$  شیب نزولی تنیدی را شاهد هستیم. بر طبق جدول (۳)، درصد تغییر طول نسبی از حدود  $12\%$  برای نمونه شاهد به  $36\%$  در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته و به  $12\%$  برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  می رسد. با افزایش دما از  $200^{\circ}\text{C}$  به  $250^{\circ}\text{C}$ ، استحکام و انعطاف پذیری تغییرات قابل توجهی را از خود نشان می دهند. همانطور که شکل های (۸) و (۹) قابل مشاهده است، با افزایش میزان استحکام در یک دمای مشخص آنیل، میزان انعطاف پذیری کاهش می یابد. این موضوع مخصوصاً در قبل از رخداد تبلور مجدد آلومینیوم (بین دمای  $350$  تا  $400$  درجه سانتیگراد) در نمونه ها بیشتر مشهود است.

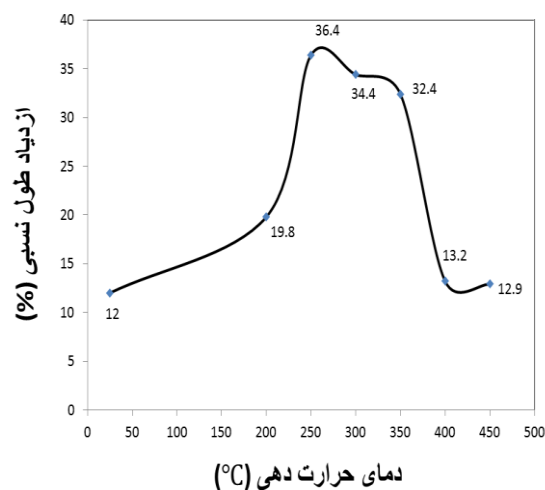
مشترک فلز تمیز زیر سطحی و فشار غلتک های نورد بالاترین استحکام را در  $400$  درجه سانتیگراد حاصل نمود.

#### ۴- بحث

شکل (۸) منحنی تغییرات استحکام کششی بر حسب دمای عملیات حرارتی و شکل (۹) منحنی تغییرات افزایش ازدیاد طول نسبی بر حسب دمای عملیات حرارتی نمونه شاهد به همراه نمونه هایی که پس از تغییر سطح مقطع  $45\%$  در دمای  $200$  تا  $450$  درجه سانتیگراد به مدت  $60$  دقیقه حرارت داده شده را نشان می دهد.



شکل (۸) تاثیر دمای آنیل بر استحکام نهایی ورق های سه لایه در آزمون کشش.



شکل (۹) تاثیر دمای آنیل بر درصد ازدیاد طول نسبی ورق های سه لایه در آزمون کشش.



از طرف دیگر به علت بهبود در ساختار اتمی فلزات، آنیل پایانی باعث کاهش سختی ورق بعد از نورد و افزایش چقرمگی پیوند می‌شود. افزایش چقرمگی پیوند موجب افزایش نیروی مورد نیاز برای توسعه ترک و استحکام پیوند می‌گردد [۱۱]. لازم به ذکر است که ورق آلومینیوم منیزیم، به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۳۷۵ درجه سانتی گراد، درون کوره الکتریکی قرار داده شده بود و پس از آن در دمای اتاق به آرامی سرد شد تا مانع ایجاد ترک های لبه ورق، حین عملیات نورد گردد. شکل (۱۰) ورق آلومینیوم منیزیم را بدون عملیات آنیل بعد از فرآیند نورد را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) تصویر ترک های ایجاد شده هنگام نورد ورق آلومینیوم منیزیم قبل از آنیل اولیه.

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش از فرآیند اتصال نوردی به منظور تولید ورق های سه لایه آلومینیوم منیزیم- آلومینیوم خالص- فولاد زنگ نزن استفاده شد. استحکام اتصال فصل مشترک ورق تولید شده در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس این پژوهش نتیجه گیری های زیر حاصل گردید:

۱. افزایش مقدار تغییر شکل باعث افزایش مقدار فلز بیرون انداخته شده به فصل مشترک دو لایه شده و مناطق

جدول (۳) مقادیر استحکام کششی و درصد افزایش طول نسبی بر حسب دمای عملیات حرارتی برای نمونه های ۴۵٪ تغییر سطح مقطع داده شده.

دمای عملیات حرارتی (شاهد)	۲۵	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	
استحکام کششی (MPa)	۶۲۰	۵۸۶	۵۵۹	۵۵۳	۵۹۲	۵۸۱	
درصد افزایش طول نسبی	۱۲	۱۹/۸	۳۶/۴	۳۰/۴	۳۲/۴	۱۳/۲	۱۲/۹

با توجه به اطلاعات بدست آمده از شکل های (۸) و (۹)، به دلیل وقوع فرآیندهای بازیابی در فولاد زنگ نزن و تبلور مجدد استاتیکی در آلومینیوم و حذف کارسختی ناشی از نورد، ورق روکش شده با آنیل در زمان های ابتدایی استحکام نهایی کاهش و انعطاف پذیری افزایش می‌یابد (۲۵۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد). اما بیشتر شدن دمای آنیل ۴۵۰ درجه سانتیگراد، باعث رشد دانه های آلومینیوم شده و با افزایش اندازه دانه، نابعایی ها مسیر بیشتری برای رسیدن به مرز دانه ها و تجمع در آن را دارند. از این رو انعطاف پذیری کاهش و بدلیل کاهش کارسختی، استحکام نهایی افزایش می‌یابد. افزایش استحکام پیوند بعد از آنیل پایانی می‌تواند مربوط به نظریه نفوذ اتمی در فصل مشترک و جنبش های اتمی کوتاه بردی باشد که با حرارت فعال شده اند [۱۰]. این نظریه بالاتر بودن نرخ افزایش استحکام پیوند در شکل (۸) در دماهای ۴۰۰°C و ۴۵۰°C را نیز توجیه می‌کند. با توجه به نظریه ی اتصال نفوذی در صورت فراهم شدن انرژی فعال سازی لازم برای نفوذ، اتم ها می‌توانند در فصل مشترک دو فلز، از طریق مکانیزم های جانشینی، بین نشینی و جاهای خالی در هم نفوذ کنند [۱۰، ۱۳]. نفوذ و حرکت در جهات مختلف باعث می‌شود که اتم های موجود در موضع پیوند با سهولت بیشتری در وضعیت مناسب کریستالی و مکان-هایی با حداقل انرژی قرار گیرند و به یک حالت پایدار برسند. با توجه به نزدیک بودن پارامتر شبکه و اندازه اتم-های آلومینیوم و آهن در فصل مشترک، تشکیل یک مرز هم سیما با حداقل حوزه های تنش می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش استحکام باشد [۱۰، ۱۳].

- پیوندی افزایش یافته و استحکام پیوند تا ۴۵٪ تغییر شکل افزایش می‌یابد.
۲. در صورتی که میزان اکسایش سطوح لایه‌ها قبل از نورد زیاد باشد، لایه‌های اکسیدی می‌تواند ایجاد باند اتصال را حتی با وجود فراهم بودن اختلاف مناسب بین تغییر شکل به تعویق بیندازد.
۳. با افزایش درصد تغییر شکل، ترک‌های سطحی شکل گرفته بر روی سطوح لایه‌ها و عرض بازشدگی دهانه ترک‌ها افزایش و فاصله نسبی آنها کاهش می‌یابد. به این ترتیب استحکام اتصال افزایش می‌یابد.
۴. با بررسی نمونه‌های تست کشش، بهترین انعطاف پذیری به عنوان اندیس شکل پذیری ورق، پس از ۶۰ دقیقه آنیل در بین دماهای ۳۰۰°C تا ۴۰۰°C به دلیل وقوع تبلور مجدد در لایه‌ی آلومینیوم، حذف تنش‌های پسماند فرآیند نورد و عدم تشکیل لایه‌ی میانی حاصل شد.
۶. فهرست علائم
- |        |                          |
|--------|--------------------------|
| (°C)   | سانتیگراد                |
| MPa    | مگاپاسکال                |
| %      | درصد                     |
| CNC    | کامپیوتر کنترل عددی      |
| M      | میلی متر                 |
| FE-SEM | میکروسکوپ الکترونی روبشی |
| Al     | آلومینیوم                |
| AlMg6  | آلومینیوم منیزیم         |
| STS    | فولاد زنگ نزن            |
- ۷- مراجع
- [1] L.Chen، Z.Yang، B.Jha، G.Xia، J.W.Stevenson، "Clad metals، roll bonding and their applications for SOFC interconnects"، J. of Power Sources.152(2005) 40-45.
- [2] L. Y. Sheng, F. Yang, T. F. Xi, C. Lai and H. Q. Ye, "Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling," *Composites*, p. 1468-1473, 2011.
- [3] H. OLIA, M. ABBASI and S. H. RAZAVI, "Evaluation of diffusion and phase transformation at Ag/Al bimetal produced by cold roll welding," *Trans Nonferrous Met*, vol. Soc China 22, p. 312\_317, 2012.
- [4] R. Jamaati and M. Toroghinejad, "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, p. 4508-4513, 2010.
- [۵] محسنی م، "پیش بینی نسبت ضخامتی بهینه به منظور ایجاد جوش سرد در ورق های نولایه غیر متقارن کنفرانس شکل دهی فلزات"، کنفرانس شکل دهی و مواد ایران، دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
- [6] M. Abbasi, A. Karimi Taheri and M. T. Salehi, "Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process," *Alloys and Compounds*, p. 233\_241, 2001.
- [7] D. Charles and P. Tuffile, "Copper-Clad Stainless Steel Architectural Material," 2007.
- [8] M. Abbasi and M. R. Toroghinejad, "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.
- [9] L. R. Vaidyanath, M. G. Nicholas and D. R. Milner, "1959 Br. Weld."
- [10] J. Washburn and H. A. Mohamed, "mechanism of solid state pressure welding," *welding research supplement*, pp. 302-310, 1975.
- [11] M. R. Toroghinejad and R. Jamaati, "Cold roll bonding bond strengths," *Materials Science and Technology*, vol. 0, pp. 1-7, 2010.
- [12] R. Jamaati and M. R. Toroghinejad, "Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process," *Materials Science and Engineering*, vol. 527, p. 2320-2326, 2010.
- [13] N. F. Karakazov, *Diffusion Bonding Of Metals*, Pergamon Press, 1985.

