



بررسی حد شکل دهی کامپوزیت چندلایه فرآوری شده با روش پیوند نوردی

داود رحمت آبادی¹، مسلم طیبی²، بهنام نورمحمدی خیارک³، رامین هاشمی^{4*}

- 1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
 4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 * تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 آبان 1397

پذیرش: 15 فروردین 1398

ارائه در سایت: آذر 1398

کلیدواژگان:

کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم

پیوند سرد نوردی

نمودار حد شکل پذیری و خواص

مکانیکی

در دودهمه اخیر، توسعه کامپوزیت‌های لایه‌ای و همچنین روش‌های تولید آن‌ها به یک موضوع جذاب برای محققان تبدیل شده است. فرایند پیوند نوردی، یک جوش حالت جامد برای ایجاد پیوند بین گستره وسیعی از فلزات با استفاده از یک نورد ساده است. در این تحقیق، کامپوزیت چندلایه آلومینیوم 5052-منیزیم AZ31B با استفاده از فرایند پیوند نوردی تولید و شکل‌پذیری آن مورد بررسی قرار گرفت. عملیات نورد با اعمال کاهش ضخامت 70% در دمای اتاق انجام شد. شکل‌پذیری کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم با استفاده از آزمایش اتساع با سنبه نیم‌کروی در بارگذاری‌های متفاوت انجام و نمودار حدشکل‌پذیری ترسیم شد. نمودارهای حدشکل‌پذیری کاربردی‌ترین روش برای به‌دست آوردن شکل‌پذیری ورق است که کرنش‌های حدی قبل از شکست و گلوپی را مشخص می‌کند. علاوه بر شکل‌پذیری، خواص مکانیکی و سطح مقاطع شکست نیز با استفاده از آزمون کشش، میکروسختی، میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به شکل‌پذیری کم منیزیم و تولید کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم در دمای اتاق، سطح منحنی حد شکل‌پذیری مطلوب و مناسب بوده که علت آن عدم جدایش بین فصل مشترک‌های آلومینیوم و منیزیم و جبران تردی منیزیم با شکل‌پذیری بالای آلومینیوم است. همچنین نتایج خواص مکانیکی نشان داد که به دلیل کارسرد و افزایش چگالی ناهنجاری، استحکام و میکروسختی کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم نسبت به آلومینیوم اولیه به ترتیب 149/5% و 80% بهبود یافت. تصاویر سطح مقطع شکست نشان داد که آلومینیوم قبل و بعد از نورد، دارای شکست نرم با اندازه و تعداد میکروحفرات متفاوت است که بعد از نورد اندازه و عمق میکروحفرات کاهش یافته است.

Investigation of forming limit of multi-layered composite processed by roll bonding method

Davood Rahmatatabadi¹, Moslem Tayyebi², Behnam Nourmohammadi Khiarak³, Ramin Hashemi^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Material Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- Department of Material Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
 Received 2 November 2018
 Accepted 4 April 2019
 Available November 2019

Keywords:

Al/Mg composite
 Cold roll bonding
 Forming limit diagram and
 mechanical properties

Abstract

In the past two decades, the development of layered composites as well as their manufacturing methods has become a fascinating subject for researchers. The CRB is a solid-state welding to create a bonding between a wide ranges of metals using a simple rolling. In this study, the multi-layered Al5052/MgAZ31B composite was produced by CRB and its formability was studied. Rolling operations were performed by applying a 70% reduction in room temperature. The formability of Al/Mg composite was carried out using stretch test with semi-circular punch in different loading and the forming limit diagram was drawn. FLDs are the most practical method for obtaining sheet formability, which determines the strain before necking and fracture. In addition to formability, mechanical properties and fracture surface of Al/Mg were also studied using a tensile test, microhardness, optical and scanning electron microscopy. Due to low formability of magnesium and the production of Al/Mg composite at room temperature, the surfaces of the FLD is desirable due to the lack of separation between the aluminum/magnesium interfaces and the compensation tightness of magnesium with high formability of aluminum. Also, the results of mechanical properties showed that strength and microhardness of Al/Mg composite compare to initial aluminum improved 149.5% and 80%, respectively, due to the cold working and increasing density of dislocations. The images of the fracture surfaces showed that the aluminum before and after rolling had a ductile fracture with different size, number of dimples that after the rolling the size and depth of the dimples decreased.

Please cite this article using:

D. Rahmatatabadi, M. Tayyebi, B. Nourmohammadi Khiarak, R. Hashemi, Investigation of forming limit of multi-layered composite processed by roll bonding method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 12-23, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به نیاز صنایع مختلف به مواد جدید، فلزات و کامپوزیت‌های لایه‌ای و روش‌های تولید آن بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. فلزات و کامپوزیت‌های لایه‌ای عموماً دارای خواص منحصر به فرد در استحکام، مدول الاستیسیته، نسبت استحکام به وزن و خواص الکتریسیته و مغناطیسی مناسب هستند. در این بین، کامپوزیت‌های لایه‌ای پایه آلومینیوم به دلیل خواص عالی و در دسترس بودن، بیش از فلزات دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. در کنار آلومینیوم معمولاً از فلزات با چگالی پایین و استحکام مناسب برای دستیابی به نسبت استحکام به وزن بالا به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود. منیزیم و آلومینیوم از سبک‌ترین فلزات با چگالی حدود 1700 و 2700 کیلوگرم بر متر مکعب هستند و منیزیم 33% سبک‌تر از آلومینیوم است. دلیل استفاده بسیار از فلز منیزیم استحکام قابل قبول، چگالی پایین، خواص مکانیکی مناسب، داری خاصیت جذب انرژی بالا، ماشین کاری خوب، شکل پذیری سرد و رسانش حرارتی مناسب می‌باشد. آلومینیوم نیز دارای استحکام و شکل پذیری بیشتر از منیزیم می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از فلزات سبک آلومینیوم و منیزیم به علت چگالی کم در ساخت وسایل حمل و نقل مانند هواپیما، کشتی و خودرو به شدت افزایش یافته است و به همین دلیل کاربرد آنها در کنار یکدیگر نیاز به اتصال غیر هم‌جنس آن‌ها را به وجود آورده است [2]. از طرفی به دلیل اینکه منیزیم ساختار کریستالی هگزاگونال دارد و صفحات لغزشی آن در دمای اتاق محدود است استفاده و شکل‌دهی آن در دمای محیط دارای محدودیت است. در سال‌های اخیر آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم توجه زیادی را به خود جلب کرده است و به دلیل ترکیب برجسته از استحکام ویژه آلیاژ منیزیم و مقاومت در برابر خوردگی عالی آلیاژ آلومینیوم، پتانسیل بالایی در صنایع خودروسازی دارند. علاوه بر این، به عنوان سازه‌های با وزن کم، ترکیبی از آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم می‌تواند انتشار دی اکسید کربن را با کاهش وزن وسایل نقلیه در صنعت خودرو کاهش دهد [3]. در کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم/آلومینیوم که منیزیم به عنوان هسته توسط آلومینیوم پوشش داده می‌شود، آلومینیوم با محافظت از منیزیم، باعث بهبود مقاومت به خوردگی آن می‌شود و همچنین با ایجاد تنش فشاری در سطح توانایی تغییر شکل آن را نیز تقویت می‌کند [3]. همچنین کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم به دلیل خواص عالی و هم‌زمان مانند چگالی پایین، استحکام بالا و مقاومت به

خوردگی عالی به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها، به ویژه هوافضا، خودرو و محصولات الکترونیکی، با هدف کاهش چشم‌گیر وزن قطعات سازه و صرفه‌جویی در هزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [4].

از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولید کامپوزیت‌های چندلایه، روش پیوند سرد نوردی به دلیل سادگی، عدم نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و با توان بالا و خواص مکانیکی عالی نمونه‌های تولید شده، رشد و توسعه سریع‌تری در مقایسه با سایر روش‌ها داشته است [2]. پیوند نوردی یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که برای اتصال فلزات مشابه یا غیر مشابه استفاده می‌شود. در این فرایند دو یا چند فلز یا آلیاژ روی هم قرار داده شده و از غلطک‌های نورد عبور داده می‌شود [5-8]. طی سالیان مختلف و با گذر زمان، اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد¹ [9-13] پیوند به وسیله نورد سرد² [14] پوشش به وسیله نورد³ [15] پیوند نورد سرد⁴ [16، 17] برای پیوند سرد نوردی توسط محققان ارائه شده است. در سال‌های اخیر از فرایند پیوند سرد پیوندی به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل لایه‌ای بزرگ استفاده می‌شود [1]. در فرایند پیوند نوردی، با اعمال فشار مورد نیاز از طریق نورد یک جوش حالت جامد بین سطوح در تماس فلز ایجاد خواهد شد. قابل ذکر است که به منظور ایجاد جوش مناسب بین لایه‌ها، تمیزکاری و حذف اکسیدهای سطحی ضروری است. مطابق با نظر بای⁵ و ژانگ⁶، دو روش رایج برای حذف آلاینده‌ها و اکسیدهای سطحی، تمیز کردن شیمیایی و مکانیکی است [18]. جوش نوردی، متأثر از پارامترهای مختلفی است که توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نرخ کرنش یا زمان جوشکاری نوردی در سال 1959 توسط وایدیاناث⁷ مورد بررسی قرار گرفت [12]. پن و همکاران به بررسی اثر دما بر استحکام پیوند پرداختند [17]. دانش‌منش و کریمی به بررسی اثر درصد تغییر شکل در حین نورد در دماهای مختلف پرداختند [19]. وایدیاناث و همکاران در سال 1959 و بعدها محمد⁸ و واشبرن⁹ در سال 1975 ادعا کردند که مکانیزم اتصال نوردی بر اساس تئوری فیلم است و به دلیل دمای پایین فرایند تئوری فیلم نقش اصلی در ایجاد اتصال را ایفا می‌کند [12، 20]. با توجه به این

¹ Cold Pressure Welding by Rolling

² Bonding by Cold Rolling

³ Clad Sheet by Rolling

⁴ Cold Roll Bonding

⁵ Bay

⁶ Zhang

⁷ Vaidyanath

⁸ Mohamed

⁹ Washburn

ارتباط بین کرنش‌های اصلی به هنگام شروع گلوپی موضعی است [22]. این منحنی‌ها به دو روش تئوری و تجربی به دست می‌آیند. در روش تجربی ورق را تحت مسیر مختلف کرنش گذاری و در لحظه‌ی گلوئی شدن عملیات را متوقف و کرنش‌های حدی را اندازه‌گیری می‌کنند.

در سال‌های اخیر با استفاده از روش‌های مختلف، شکل‌پذیری ورق‌های دولایه مورد بررسی قرار گرفته شده است. هوانگ و هونگ با استفاده از فرایند کشش عمیق، شکل‌پذیری کامپوزیت دولایه آلومینیوم/مس را برای پارامترهای مختلف نظیر ضخامت، حد کشش و همچنین پارگی را از دیدگاه مکانیک شکست مورد بررسی قرار دادند [23]. عطریان و فرشته‌صنعی شکل‌دهی ورق‌های دولایه برنج/فولاد را با فرایند کشش عمیق مورد مطالعه قرار دادند [24]. جلالی‌آقچای و همکاران به بررسی تاثیر خصوصیات هندسی لایه‌ها بر شکل‌پذیری کامپوزیت‌های دولایه‌ی آلومینیوم/فولاد پرداختند [25]. زاهدی و همکاران فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های دولایه آلومینیوم/فولاد کم کربن را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند [26]. دهقانی و سلیمی شکل‌پذیری ورق دولایه مس/فولاد ضدزنگ در فرایند کشش عمیق بررسی کردند [27]. کرجی‌بانی و همکاران با استفاده از نمودارهای حد شکل‌پذیری کرنش‌های حدی را برای کامپوزیت دولایه آلومینیوم/مس تولید شده به روش جوش انفجاری بدست آوردند. رحمت‌آبادی و هاشمی با استفاده از آزمون ناکازیم، نمودار حد شکل‌پذیری آلومینیوم دولایه تولید شده به روش پیوند نوردی و نورد تجمعی را ترسیم کردند [7، 28]. باقری و همکاران، شکل‌پذیری ورق سه لایه برنج/فولاد/برنج تولید شده به روش پیوند نوردی را با استفاده از آزمون اریکسون مطالعه کردند و شکل‌پذیری را با اندازه‌گیری ارتفاع گنبد در آزمون اریکسون بررسی کردند [29]. به صورت خلاصه می‌توان گفت که تاکنون برای ورق‌های تولید شده به روش جوش سرد نوردی، چقرمگی شکست و نمودار حد شکل‌پذیری برای آلومینیوم [7، 8]، چقرمگی شکست و خواص مکانیکی برای کامپوزیت‌های مختلف [5، 30-32] بررسی شده است. همچنین بر اساس تحقیقات پیشین برای ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم، به‌دلیل شکل‌پذیری محدود منیزیم در دمای محیط از نورد گرم استفاده شده است [33]. بنابراین در این مقاله برای اولین بار کامپوزیت‌های آلومینیوم/منیزیم با استفاده از جوش سرد نوردی در دمای محیط تولید شد. همچنین برای اولین شکل‌پذیری یک کامپوزیت لایه‌ای تولید شده به روش پیوند نوردی با استفاده از

نظریه، لایه‌های سطحی از فلز ترد در حین نورد به دلیل اعمال کرنش بالا در دمای محیط شکسته می‌شوند و فلز پایه در شکاف لایه‌های شکسته اکستروود می‌شود. ژانگ و بای در سال 1994 یک پارامتر تحت عنوان کاهش ضخامت آستانه تعریف کردند که حداقل میزان کاهش ضخامت یا تغییر شکل برای اتصال فلزات مختلف با استفاده از پیوند نوردی بود [18]. در تغییرات بیشتر از کاهش ضخامت بحرانی، مناطق تمیز در بین ترک‌ها اکستروود می‌شوند تا جوش مناسب برقرار شود. بنابراین برای فرایند جوش نوردی، آماده‌سازی سطوح و کاهش ضخامت مناسب پارامترهای اساسی می‌باشد و در صورتی که یکی از آنها درست انجام نشود اتصالی برقرار نمی‌شود. همچنین نمونه‌ی تولیدی با روش جوش نوردی، به دلیل اعمال کرنش بالا در دمای محیط، خواص مکانیکی مطلوبی در مقایسه با ورق اولیه دارد و در صورت ایجاد پیوند مناسب استحکام تا بیش از دو برابر هم می‌تواند افزایش می‌یابد [5، 7، 8].

همان‌طور که اشاره شد، با استفاده از روش پیوند نوردی مواد و کامپوزیت‌های لایه‌ای زیادی تولید شده است و اکثر، خواص مکانیکی، متالوژیکی، اتصال و پارامترهای مؤثر بر آنها مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از پارامترهای مؤثر در فرایندهای شکل‌پذیری مشخص کردن محدوده کرنش‌های مجاز برای تغییر شکل است و مشخص کردن این محدوده قبل از انجام هر عملیات شکل‌پذیری بر روی مواد مختلف ضروری است و با توجه به امکان استفاده از کامپوزیت‌های لایه‌ای در صنایع مختلف برای عملیات شکل‌پذیری، تعیین محدوده کرنش‌های مجاز می‌تواند سبب توسعه کاربردی این مواد شود.

در حالت کلی، شکل‌دهی ورق‌های فلزی عبارت است از انجام یک تغییر شکل پلاستیک که روی ورق انجام می‌پذیرد تا یک قطعه مهندسی با شکل دلخواه تولید گردد. برای انجام این کار روش‌های گوناگونی وجود دارد که در هر یک از آنها شیوه‌های بارگذاری و شرایط مرزی متفاوتی بکار گرفته می‌شود. فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی دارای طبیعت کششی بوده و مقدار تغییر شکلی که هر مرحله می‌توان ایجاد کرد با شروع ناپایداری کششی، گلوپی شدن و پارگی محدود می‌گردد. از طرف دیگر به دلیل نازک بودن ورق در این فرایندها، احتمال رخ دادن چروکیدگی در جاهایی که یکی از تنش‌های اصلی فشاری باشد، وجود دارد. ایجاد گلوپی یکی از محدودیت‌های شکل‌دهی می‌باشد [21]. منحنی‌های حد شکل‌دهی در حقیقت محدوده‌ی ترکیب کرنش‌هایی است که شروع گلوپی موضعی را مشخص می‌کند. به‌عبارت‌دیگر منحنی‌های حد شکل‌دهی نشان‌دهنده‌ی

توسط سیم فولادی به هم محکم بسته می‌شوند و سپس عملیات نورد با اعمال حدود 70% کاهش ضخامت ایجاد شد، به طوری که ضخامت قبل از نورد 9 میلی‌متر به حدود 3 میلی‌متر کاهش یافت. عملیات نورد با استفاده از نورد آزمایشگاهی با قطر غلطک‌های 110 میلی‌متر، در دمای اتاق و بدون استفاده از روان کار انجام شد.

Table 1 Specifications of 5052 Al alloy and Mg AZ31B

جدول 1 مشخصات آلومینیوم آلیاژی 5052 و منیزیم آلیاژی AZ31B

ماده	ترکیب شیمیایی (%)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)
آلومینیوم آلیاژی 5052	Al bal., Mg 2.2, Fe 0.4, Cr 0.2, Si 0.2, Mn 0.1, Zn 0.1, Cu 0.1	155/6	26/1
منیزیم آلیاژی AZ31B	Mg 95.8, Al 3, Zn 1, Mn 0.2	144/8	16/3

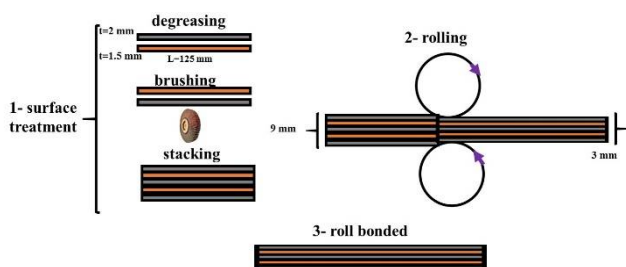


Fig. 1 Schematic illustration of CRB process

شکل 1 شماتیک فرایند پیوند سرد نوردی

2-3- بررسی، ناپایداری پلاستیکی، خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست

تصویربرداری از میکروساختار کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، در جهت عمود بر نورد و در صفحه ضخامت طول با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام شد. قبل از انجام تصویربرداری، جهت تسهیل در آماده‌سازی از مانت سرد استفاده شد و سپس عملیات پولیش توسط پولیش گردان به ترتیب با استفاده از سنباده‌های 4000-800، شست‌وشو با محلول آب و صابون، میکروذرات آلومینا و الکل جهت حذف اکسیدهای سطحی انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M-9 آماده شد و آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق، با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ و با استفاده از دستگاه سنتام انجام شد. در شکل 2، تصاویر نمونه‌های آزمون کشش بعد از انجام تست ارائه شده است. آزمون میکروسختی ویکرز برای هر لایه به صورت مجزا تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول)

آزمون ناکازیم و ترسیم نمودار حد شکل‌پذیری آن بررسی شد. در این مقاله با استفاده از آزمون ناکازیم، محدوده کرنش‌های اصلی مجاز قبل از گلوبی شدن در مسیر کرنش‌های مختلف برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی مورد مطالعه قرار گرفت و نمودار حد شکل‌پذیری آن ترسیم شد. همچنین خواص مکانیکی، شکست‌نگاری و ناپایداری پلاستیکی با استفاده از آزمون کشش، میکروسختی، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری بررسی شد.

2- روش تحقیق

2-1- مواد تحقیق

خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی مواد اولیه آلومینیوم آلیاژی 5052 و منیزیم آلیاژی AZ31B بدون عملیات حرارتی با ضخامت‌های 2 و 1/5 میلی‌متر در جدول 1 ارائه شده است.

2-2- فرایند پیوند سرد نوردی

در فرایند پیوند سرد نوردی، پیوند مناسب در فصل مشترک زمانی ایجاد می‌شود که انبساط سطحی در سطوح ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار اعمالی توسط نورد باید به اندازه کافی باشد به طوری که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود که این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [1, 16, 19, 34-36]. این فرایند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد. در شکل 1، شماتیک فرایند پیوند نوردی برای تولید کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم ارائه شده است. فرایند پیوند سرد نوردی، در دو مرحله آماده‌سازی اولیه و عملیات نوردی انجام می‌شود [37]. مطابق با شکل 1، نمونه‌های اولیه در ابعاد یکسان 125 میلی‌متر طول، 70 میلی‌متر عرض و ضخامت‌های 2 و 1/5 برای آلومینیوم و منیزیم بریده شدند. بر این اساس دو ورق منیزیم و سه ورق آلومینیوم برای حذف آلودگی‌های سطحی تحت عملیات آماده‌سازی سطحی قرار می‌گیرند. این عملیات شامل، شست‌وشو با آب و صابون، چربی‌زدایی با استفاده از حمام استون و برس-کاری مکانیکی می‌باشد. برس‌کاری با استفاده از سنبه خورشیدی فولادی و ماشین دریل ستونی انجام شد. پس از عملیات آماده‌سازی دو ورق منیزیم و سه ورق آلومینیوم روی هم قرار می‌گیرند به طوری که ورق‌های آلومینیوم سطح خارجی کامپوزیت را تشکیل می‌دهند و دو ورق منیزیم بین لایه‌های آلومینیومی قرار می‌گیرند. همچنین به منظور جلوگیری از لغزش نمونه‌های روی هم، هر ورق از چهار طرف سوراخ شده و

اندازه‌گیری شد.

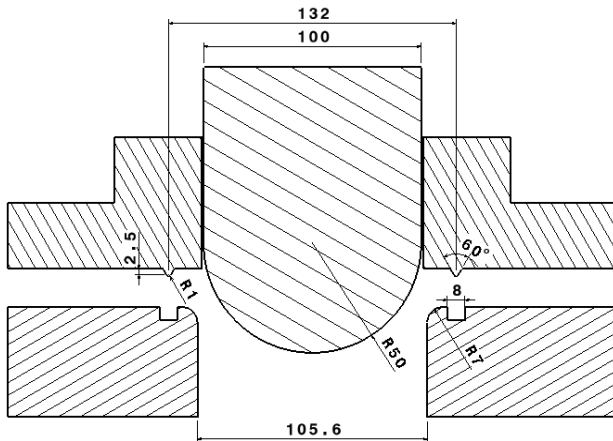


Fig. 3 Schematic representation of experimental setup for FLDs determination [28]

شکل 3 شماتیک مجموعه آزمایش تجربی برای تعیین کردن نمودارهای حد شکل‌پذیری [28]

برای آزمون نمودار حد شکل‌دهی کامپوزیت آلومینیوم/ منیزیم، 8 نمونه مطابق با شکل 4 در طول یکسان و عرض‌های مختلف بر اساس استاندارد ISO 12004 و استفاده از مقیاس یک‌چهارم با توجه به ابعاد قالب و ابعاد نمونه‌های تولید شده، به وسیله ماشین وایرکات آماده شد. نمونه‌های مستطیلی جهت تعیین منحنی سمت راست (کشش تک‌محوره) و نمونه‌های دمبلی شکل و شبیه نمونه آزمون کشش برای تعیین منحنی سمت چپ (کشش دو محوره) مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در شکل 5 مراحل مختلف آزمون ناکازیم در کار حاضر ارائه شده است همچنین در این شکل مجموعه قالب، پرس، نمونه‌های آماده شده قبل و بعد از آزمون مشاهده می‌شود. بعد از آماده‌سازی این نمونه‌ها، برای یافتن کرنش‌های حدی، گریدهای دایروی به قطر $2/5$ میلی‌متر (یک اینچ) به کمک حک الکتروشیمیایی روی نمونه‌ها حک شدند.

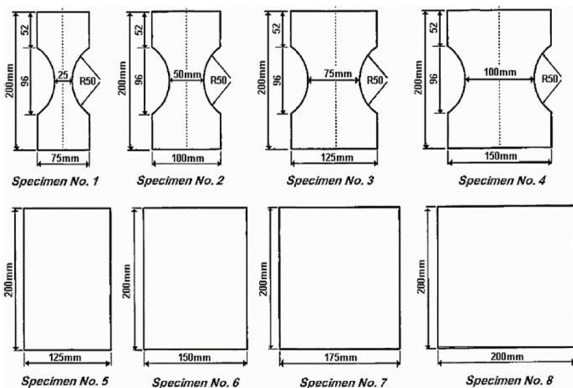


Fig. 4 The different specimen geometry to obtain the FLD [28]

شکل 4 هندسه نمونه‌های مختلف برای آوردن نمودارهای حد شکل‌پذیری [28]



Fig. 2 samples of tensile test after test

شکل 2 نمونه‌های آزمون کشش بعد از آزمون

پس از انجام تصویربرداری نوری، از نمونه‌های آماده شده برای آزمون میکروسختی استفاده شد و برای هر لایه به صورت تصادفی در بیش از 10 نقطه مختلف اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد.

سطح نمونه‌های شکست، پس از انجام آزمایش کشش تک‌محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین مکانیزم شکست برای کامپوزیت آلومینیوم/ منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مورد بررسی قرار گرفت.

2-4- نمودارهای حد شکل‌پذیری

در این مقاله به منظور بررسی شکل‌پذیری کامپوزیت آلومینیوم/ منیزیم، از آزمون ناکازیم (کشش با سنبه سر نیم کروی) استفاده شد و نهایتاً برای تعیین کرنش‌های حدی قبل از گلوبی، نمودار حد شکل‌دهی ترسیم شد. مکانیزم آزمون ناکازیم در شکل 3 به صورت شماتیک ارائه شده است. این آزمون شامل کشش نمونه تا پارگی با استفاده از سنبه سر نیم کروی و قالب برای نمونه‌هایی با طول یکسان و عرض‌های مختلف می‌باشد. لذا تعیین نمودار حد شکل‌دهی به روش تجربی شامل مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمون ناکازیم، خواندن کرنش‌های عملی و رسم نمودار می‌باشد که هر کدام به اختصار توضیح داده می‌شود [28]. نمودارهای حد شکل‌پذیری، کاربردی‌ترین روش برای به‌دست آوردن محدوده کرنش‌های مجاز برای مواد مختلف و استفاده از آن برای امکان‌سنجی فرایندهای مختلف شکل‌پذیری است.

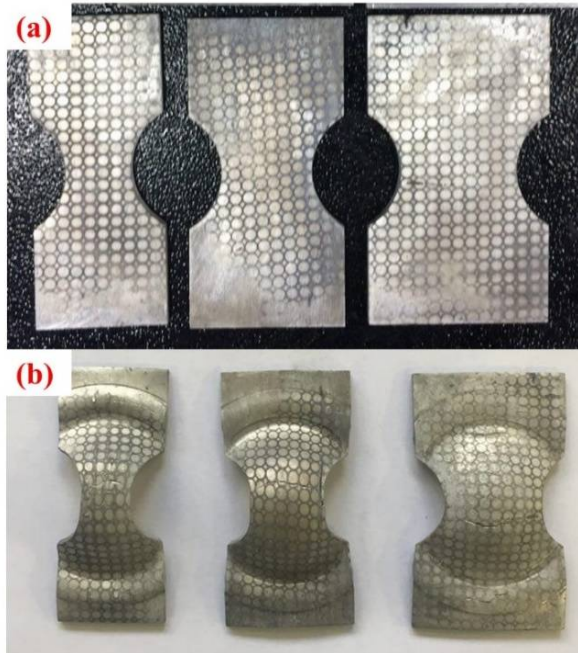


Fig. 6 Al/Mg composite samples: (a) before and (b) after Nakazima test
شکل 6 نمونه‌های کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم: (a) قبل و (b) بعد از آزمون ناکازیم

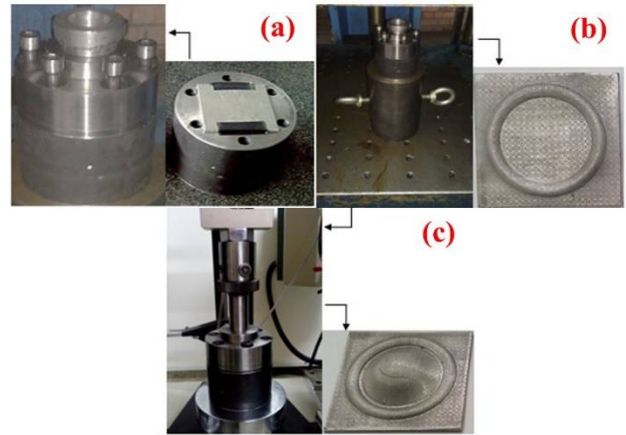


Fig. 5 Experimental and different steps of Nakazima test

شکل 5 تجهیزات و مراحل مختلف آزمون ناکازیم

اساس آزمون ناکازیم بدین شکل است که با مهر ورق بین ورق گیر و ماتریس، با استفاده از سنبه ورق نیم‌کروی تحت کشش قرار گرفته تا زمانی که نیرو در دیاگرام نیرو-جابجایی افت کند یا به عبارت دیگر پارگی رخ دهد. در شکل 5 علاوه بر مراحل مختلف آزمون، نمونه‌های شبکه‌بندی شده با استفاده از حک الکتروشیمیایی نیز مشاهده می‌شود.

پس از انجام آزمون ناکازیم، جهت ترسیم نمودار کرنش‌های ایجاد شده در نمونه‌ها را به وسیله میکروسکوپ ورنیه‌دار با دقت 1 میکرومتر اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری مقادیر a و b که به ترتیب بیانگر مقادیر قطرهای ثانویه بزرگ و کوچک بیضی می‌باشند و داشتن مقادیر اولیه قطر دایره (d) و استفاده از روابط مقادیر کرنش‌های مهندسی و حقیقی حدی محاسبه می‌شود.

$$e_{\text{major}} = \frac{a - b}{d} \times 100 \quad (1)$$

$$e_{\text{minor}} = \frac{b - b}{d} \times 100 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{major}} = \ln(1 + e_{\text{major}}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{minor}} = \ln(1 + e_{\text{minor}}) \quad (4)$$

با محاسبه مقادیر کرنش بزرگ و کوچک برای تمام نمونه‌های آزمون ناکازیم، نقاطی به دست می‌آید که با عبور منحنی از این نقاط نمودار حد شکل‌دهی حاصل می‌گردد. همچنین در شکل 6، نمونه‌های کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم قبل و بعد از آزمون ناکازیم برای سمت چپ منحنی حد شکل‌پذیری ارائه شده است.

3-1- ناپایداری پلاستیکی

در شکل 7 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عمود بر نورد و در صفحه طول-ضخامت کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ارائه شده است.

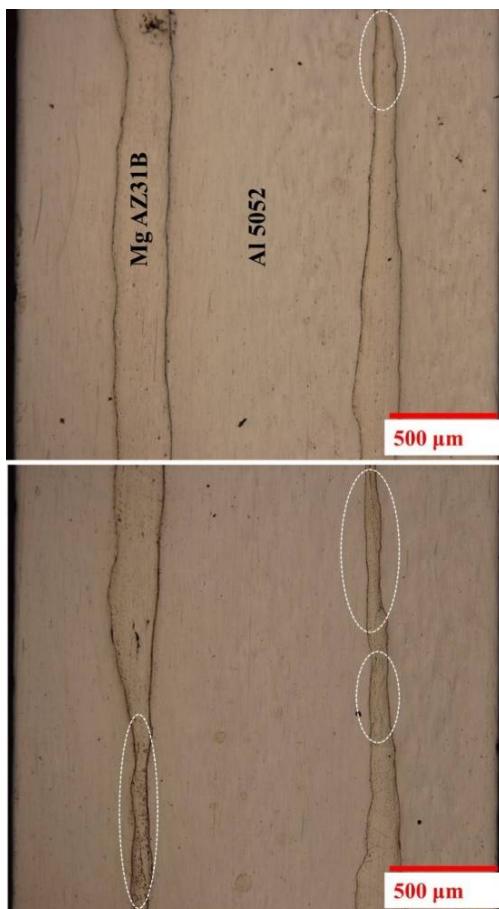


Fig. 7 Optic microcopy images of multi-layered Al/Mg composite produced via CRB method

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم چندلایه تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

3- نتایج و بحث

حالت دوم، گسیختگی و شکست توسط برش داخلی میان حفرات رخ می‌دهد که در آن تغییر شکل برشی ساده حکم فرما می‌باشد [6، 43]. در شکل 9 سطح مقطع شکست ورق اولیه با ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار (آلومینیوم 5052) قبل از نورد ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مکانیزم شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار هستند، تشکیل حفره و سپس شکست نرم است. در شکل 9، دیمپل‌های¹ هم‌محور یا نیم‌کره‌ای مشاهده می‌شود که از مشخصه‌های شکست نرم است. در فلزات با چقرمگی بالا اندازه ترک‌ها و حفرات بسیار بزرگتر می‌باشد و خود این حفرات با بزرگتر شدن موجب شکست می‌شوند ولی در سایر موارد از پیوستگی میکرو حفرات، ترک‌ها ایجاد و گسترش می‌یابند. در شکل 10، تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح مقطع شکست کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم بعد از فرایند پیوند نوردی ارائه شده است.

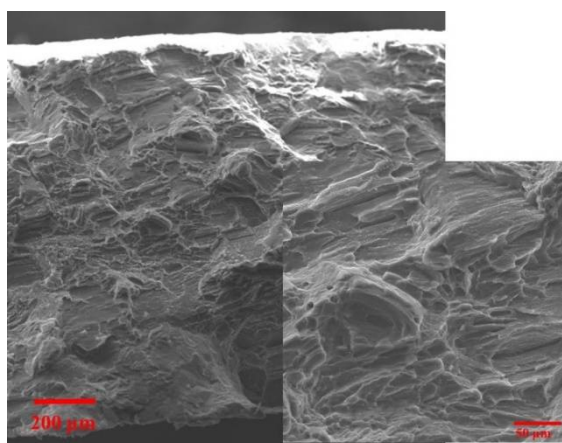


Fig. 8 Tensile fracture surfaces of AZ31 Mg alloy

شکل 8 سطح مقطع شکست منیزیم آلیاژی AZ31B

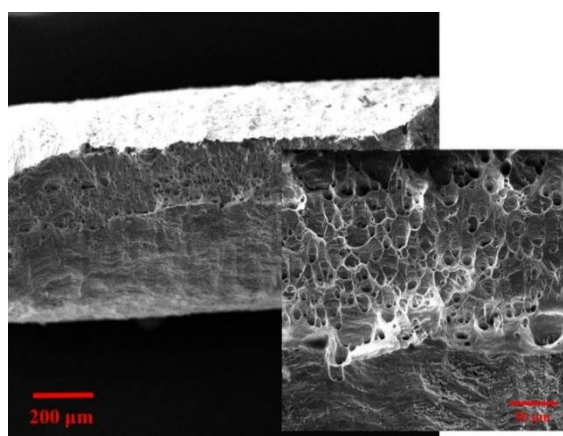


Fig. 9 Tensile fracture surfaces of 5052 Al alloy

شکل 9 سطح مقطع شکست آلومینیوم آلیاژی 5052

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیوند مناسب بین فصل مشترک‌های آلومینیوم و منیزیم به خوبی برقرار شده است و جدایش و ناپیوستگی بین لایه‌ها دیده نمی‌شود. اعمال کرنش بالا، انتخاب ابعاد اولیه مناسب، آماده‌سازی سطحی مناسب لایه‌های در تماس، شکل‌پذیری بالا و کوتاه بودن زمان عملیات آماده‌سازی سطحی تا نورد به دلیل کاهش اکسیداسیون سطوح، از دلایل اصلی پیوند مناسب در فصل مشترک کامپوزیت‌های لایه‌ای تولید شده به روش پیوند نوردی می‌باشد. در این مقاله نیز به دلیل اعمال کرنش بالا (کاهش ضخامت 70%)، استفاده از آلومینیوم آلیاژی 5052 با شکل‌پذیری بالا و عملیات آماده‌سازی کامل (شیمیایی و مکانیکی) سبب ایجاد پیوند مناسب و عاری از ناپیوستگی و جدایش در فصل مشترک آلومینیوم/منیزیم شده است. همچنین در شکل 7، ناپایداری پلاستیکی شدیدی در لایه‌های منیزیم مشاهده می‌شود که اعمال کرنش بالا در حین نورد، تفاوت در خواص سیلان و ضخامت آلومینیوم و منیزیم، اعمال کارمکانیکی در دمای محیط و شکل‌پذیری کم منیزیم از دلایل اصلی ناپایداری پلاستیکی در لایه‌های منیزیم می‌باشد [5، 30، 38-41]. البته همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار لایه‌ای حفظ شده و تقویت‌کننده منیزیمی در سراسر نمونه دچار شکست نشده است.

3-2- شکست نگاری

در شکل‌های 8 و 9 سطح مقطع شکست در ورق‌های اولیه (قبل از نورد) آلومینیوم آلیاژی 5052 و منیزیم AZ31B با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده است. در حالت کلی دو نوع مکانیزم شکست نرم و ترد برای فلزات وجود دارد که با توجه به ساختار کریستالی فلزات می‌توانند شکست نرم یا ترد از خود نشان دهند [42]. منیزیم با ساختار هگزاگونال دارای شکست کاملاً ترد است. عموماً فلزات با ساختار کریستالی هگزاگونال دارای شکست ترد هستند [33]. مکانیزم شکست ترد، عدم تشکیل میکرو حفرات و تغییر شکل در سطح شکست و سطح شکست صاف و یکنواخت است که در شکل 8 برای منیزیم نیز مشاهده می‌شود.

در حالت کلی برای شکست نرم، دو مکانیزم حاکم است که این دو عامل در موقعیت‌های مختلف برای ایجاد شکست نرم با یکدیگر مشارکت دارند. در حالت اول برای شکست نرم، در نزدیکی محل شکست به علت تنش‌های اعمال شده حفرات و میکرو حفرات ایجاد شده و با افزایش تنش رشد می‌کنند. اما در

¹ Dimples

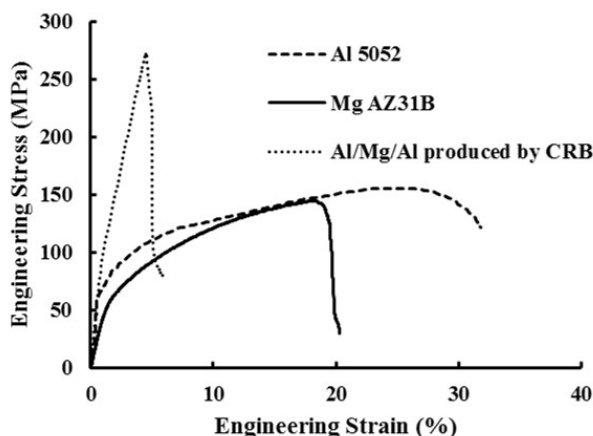


Fig. 11 engineering stress-strain curves for annealed and two-layer of aluminum strips produced by CRB Process

شکل 11 منحنی تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌ی آنیل شده و ورق دو لایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

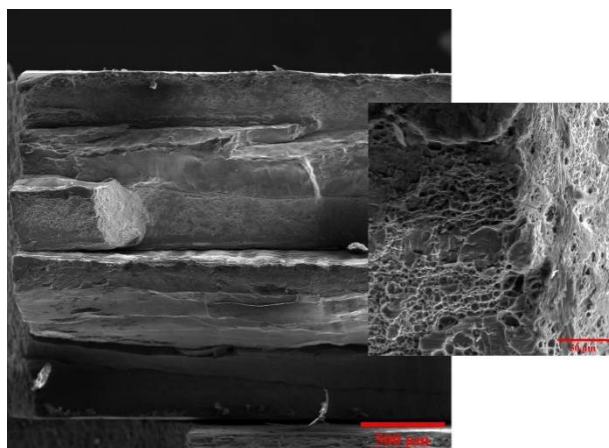


Fig. 10 Tensile fracture surfaces of multi-layered Al/Mg composite Produced via CRB method

شکل 10 سطح مقطع شکست کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم چندلایه تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

مطابق با جدول 2، استحکام کششی کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم پس از نورد به 273.5MPa می‌رسد که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم و منیزیم به ترتیب 76% و 89% بهبود یافته است. در مقابل، مقدار ازدیاد طول به شدت کاهش می‌یابد و برای کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم به حدود 5% می‌رسد که نسبت به نمونه‌ی آلومینیوم و منیزیم بیش از 80% و 70% کاهش یافته است. دلیل اصلی این افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول را می‌توان به وسیله کار سرد، کاهش ضخامت بالا (70%)، کارسختی به وسیله نابه‌جایی توجیه کرد [6، 8، 28، 44-51]. کار سرد یکی از مکانیزم‌های افزایش استحکام می‌باشد که به دلیل افزایش چگالی نابه‌جایی و کارسختی باعث افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول می‌شود. با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، اعمال کرنش زیاد در دمای محیط برای فلزات مختلف تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، باعث افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول شده است و نتایج تحقیقات پیشین تأییدکننده نتایج کار حاضر است [5-7، 30، 52].

همچنین شکل 12 تغییرات میکروسختی ویکرز برای لایه‌های آلومینیوم و منیزیم در کامپوزیت تولید شده به روش پیوند نوردی و قبل از نورد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال فرایند نورد، میکروسختی ویکرز برای هر دو لایه آلومینیوم و منیزیم به شدت افزایش پیدا کرده است. مقدار میکروسختی ویکرز برای آلومینیوم و منیزیم از 79/7 و 63/4 در حالت اولیه به 112/1 و 96/8 بعد از فرایند پیوندی نوردی می‌رسد. نتایج بیانگر بهبود 41% و 53% میکروسختی به ترتیب برای لایه‌های آلومینیوم و منیزیم است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار لایه‌ای با پیوند مناسب بین لایه‌ها برقرار شده است و یکی از عوامل دست‌یابی به خواص مکانیکی مطلوب، عدم جدایش و انفصال بین لایه‌ها می‌باشد. همچنین در شکل 10، تصویر مقطع شکست لایه‌ی آلومینیومی از کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود میکروحفرات و تغییر شکل سطح مقطع، تأییدکننده شکست نرم برای لایه‌ی آلومینیومی است، البته نسبت به آلومینیوم اولیه (قبل از نورد) دارای تفاوت‌هایی است. با اعمال کرنش، میکروحفرات کمتر، کم‌عمق‌تر شده که همان‌طور که قبل اشاره شد، به دلیل کاهش شکل-پذیری و چقرمگی در لایه‌ی آلومینیومی پس از نورد است.

3-3- خواص مکانیکی

نمودار تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم و منیزیم و همچنین کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی در شکل 11 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آلومینیوم آلیاژی 5052، دارای استحکام و شکل‌پذیری بالا و منیزیم نیز دارای استحکام و شکل‌پذیری مناسب است. طبق شکل 11، کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی متشکل از 66/6% آلومینیوم و 33/3% منیزیم دارای استحکام بسیار بالاتر از مواد اولیه و شکل‌پذیری بسیار محدود است. همچنین نتایج حاصل از آزمون کشش برای مواد اولیه و کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی در جدول 2 ارائه شده است.

مختلف شکل پذیری را مشخص می کند.

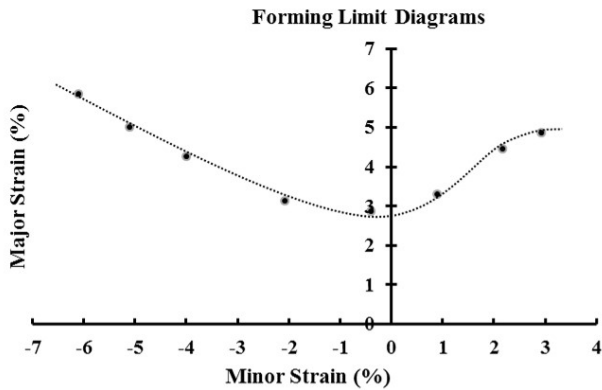


Fig. 13 FLDs of multi-layered Al/Mg composite produced via CRB method

شکل 13 نمودارهای حد شکل پذیری برای کامپوزیت چندلایه تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

سطح بالا و پایین این منحنی به ترتیب محدوده کرنش های غیرمجاز و مجاز را برای عملیات شکل پذیری مشخص می کند. سمت راست منحنی از نمونه های مستطیلی شکل برای حالت کشش-کشش به دست آمده و سمت چپ منحنی از نمونه های دمبلی شکل و تحت بارگذاری کشش-فشار بدست می آید. پایین ترین نقطه منحنی نشان دهنده کرنش های مجاز در حالت کرنش صفحه ای است و به نوعی محدودکننده عملیات شکل-پذیری است. این نقطه از منحنی را معمولاً با FLD_0 نمایش می دهند.

4- جمع بندی

در این تحقیق، شکل پذیری کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون تجربی ناکازیم و رسم نمودار حد شکل پذیری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین علاوه بر شکل پذیری، خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست، کامپوزیت تولید شده مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

- تصاویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم نشان داد که پیوند مناسب بین فصل مشترک های آلومینیوم و منیزیم به خوبی برقرار شده و انفصال بین لایه ها مشاهده نمی شود. همچنین ناپایداری پلاستیکی شدیدی در لایه های منیزیم مشاهده می شود که اعمال کرنش بالا در حین نورد، تفاوت در خواص سیلان و ضخامت آلومینیوم و منیزیم، اعمال کرنش بالا در دمای محیط و شکل پذیری کم منیزیم از دلایل اصلی آن می باشد.

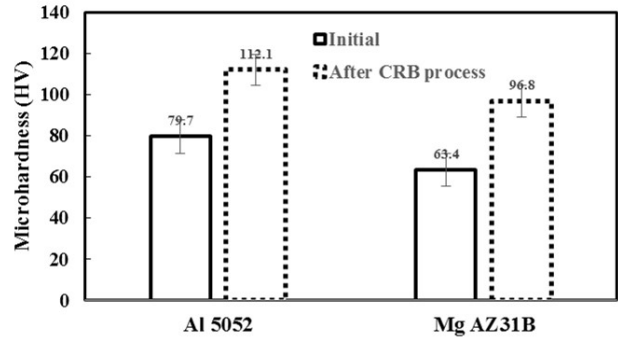


Fig. 12 micro hardness values for annealed and two layers of aluminum sheets produced by CRB process

شکل 12 میکروسختی ویکرز برای نمونه های آنیل شده و دولایه آلومینیومی تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

Table 2 Mechanical properties changing

جدول 2 تغییرات خواص مکانیکی		
ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	ماده
26.1	155.6	آلومینیوم آلیاژی 5052
16.3	144.8	منیزیم AZ31B
4.93	273.5	کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم

دلیل اصلی افزایش میکروسختی برای هردولایه آلومینیوم و منیزیم افزایش کرنش بالا در دمای محیط و افزایش چگالی نابه جایی می باشد. همچنین دلیل تفاوت در میزان افزایش میکروسختی در اختلاف آلومینیوم و منیزیم در میزان انرژی در نقص چیدمان¹ می باشد و بهبود میکروسختی ویکرز برای منیزیم با انرژی نقص در چیدمان کمتر، بالاتر است [53-55].

3-4- شکل پذیری

در این تحقیق، پس از آزمون ناکازیم، با استفاده از میکروسکوپ ورنیه دار قطر کوچک و بزرگ بیضی های ایجاد شده خوانده شد. دایره های مشخص شده در ناحیه ای از نمونه که تغییر شکل موضعی (در مجاورت ترک و شکست نمونه) در آن اتفاق افتاده است. پس از محاسبه کرنش های بزرگ و کوچک حاصل از آزمون ناکازیم در نواحی موضعی شده، نمودار حد شکل پذیری برای کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم مطابق با شکل 13 رسم شد.

در شکل 13 نمودار حد شکل پذیری کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سردی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می کنید نمودار حد شکل پذیری بدست آمده، محدود کرنش های اصلی مجاز قبل از شکست و گلوبی شدن کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم برای فرایندهای

¹ Stacking fault energy

- annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.
- [2] L. Li, K. Nagai, F. Yin, Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 9, No. 2, pp.1-11 2008.
- [3] J. Nie, M. Liu, F. Wang, Y. Zhao, Y. Li, Y. Cao, Y. Zhu, Fabrication of Al/Mg/Al composites via accumulative roll bonding and their mechanical properties, *Materials*, Vol. 9, No. 11, pp. 951, 2016.
- [4] Y. Wang, G. Luo, J. Zhang, Q. Shen, L. Zhang, Microstructure of Diffusion-Bonded Mg-Ag-Al Multilayer Composite Materials, in *Proceeding of*, IOP Publishing, pp. 012023.
- [5] D. Rahmatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. Shojaee, Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 166-174, 2017.
- [6] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016.
- [7] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of formability of aluminum sheets produced by cold roll bonding process used by Nakazima test, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 451-454, 2017.
- [8] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaee, Experiment investigation of plane stress fracture toughness for aluminum sheets produced by Cold Roll Bonding Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 101-108, 2017.
- [9] N. Bay, Cold welding. part 2: Process Variants and applications, 1986.
- [10] D. Milner, L. Vaidyarath, Significance of surface preparation in cold pressure welding, *British Welding Journal*, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.
- [11] C. Clemensen, O. Juelstorp, N. Bay, Cold welding. Part 3: influence of surface preparation on bond strength, 1986.
- [12] L. Vaidyarath, M. Nicholas, D. Milner, Pressure welding by rolling, *British Welding Journal*, Vol. 6, pp. 13-28, 1959.
- [13] P. Wright, D. Snow, C. Tay, Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling, *Metals Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 24-31, 1978.
- [14] J. Yong, P. Dashu, L. Dong, L. Luoxing, Analysis of clad sheet bonding by cold rolling, *Journal of*
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از سطح مقطع شکست نشان داد که منیزیم با ساختار هگزاگونال و آلومینیوم با ساختار مکعبی به ترتیب دارای شکست ترد و نرم هستند. همچنین زمینه آلومینیومی کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند نوردی، دارای شکست نرم همراه با میکروخفرات کوچکتر و کم‌عمق‌تر از نمونه‌ی اولیه است.
- استحکام کششی کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم پس از نورد به 273/5 MPa می‌رسد که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم و منیزیم به ترتیب 76% و 89% بهبود یافته است. در مقابل، مقدار ازدیاد طول به شدت کاهش می‌یابد و برای کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم به حدود 5% می‌رسد.
- نتایج آزمون میکروسختی ویکرز نشان داد که مقدار میکروسختی برای هر دو لایه آلومینیوم و منیزیم به شدت افزایش یافت. نتایج بیانگر بهبود 41% و 53% میکروسختی به ترتیب برای لایه‌های آلومینیوم و منیزیم است. دلیل تفاوت در میزان افزایش میکروسختی در اختلاف آلومینیوم و منیزیم در میزان انرژی در نقص چیدمان است.
- دلیل اصلی تغییرات ایجاد شده در افزایش استحکام و میکروسختی و کاهش ازدیاد طول را می‌توان به وسیله کار سرد، کاهش ضخامت بالا (70%)، کارسختی به وسیله نابه‌جایی توجیه کرد. کارسرد یکی از مکانیزم‌های افزایش استحکام می‌باشد که به دلیل افزایش چگالی نابه‌جایی و کارسختی باعث افزایش استحکام، سختی و کاهش ازدیاد طول می‌شود.
- نمودارهای حد شکل‌پذیری، کاربردی‌ترین روش برای به‌دست آوردن محدوده کرنش‌های مجاز برای مواد مختلف و استفاده از آن برای امکان‌سنجی فرایندهای مختلف شکل‌پذیری است. در این مقاله برای اولین بار، نمودار حد شکل‌پذیری کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به صورت تجربی ترسیم شد و محدوده کرنش‌های اصلی مجاز قبل از شکست و گلوپی شدن آلومینیوم/منیزیم تحت مسیر بارگذاری‌های مختلف مشخص شد. با توجه به شکل‌پذیری کم منیزیم و تولید کامپوزیت آلومینیوم/منیزیم در دمای اتاق، سطح منحنی حد شکل‌پذیری مطلوب و مناسب بوده که علت آن عدم جدایش بین فصل مشترک‌های آلومینیوم و منیزیم و جبران تردی منیزیم با شکل‌پذیری بالای آلومینیوم است.

5- مراجع

- [1] R. Jamaati, M. R. Toroghnejad, Effect of friction,

- Manufacturing Technology*, Vol. 82, No. 1-4, pp. 163-177, 2016.
- [28] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental evaluation of forming limit diagram and mechanical properties of nano/ultra-fine grained aluminum strips fabricated by accumulative roll bonding, *International Journal of Materials Research*, Vol. 108, No. 12, pp. 1036-1044, 2017.
- [29] A. Bagheri, M. R. Toroghinejad, A. Taherizadeh, Investigation of formability of three-layered brass-IF steel-brass composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 32-38, 2018.
- [30] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, Investigation of mechanical properties, fracturgraphi and microstructure of layered Al/Cu composite produced by cold roll bonding, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 311-318, 2017.
- [31] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Rashidi, R. Hashemi, Investigation of microstructure and mechanical properties for multi-layered Al/Cu/Mg composite produced by Cold Roll Bonding, *JMEUT*, Vol. 48, No. 4, pp. 203-208, 2019.
- [32] A. Sheikhi, D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, Experimental evaluation of fracture toughness for multi-layered Al/Cu/Mg composite produced by Cold Roll Bonding process, *Sharif Journal of Civil Engineering*, pp. -, 2019.
- [33] H. S. Liu, B. Zhang, G. P. Zhang, Microstructures and Mechanical Properties of Al/Mg Alloy Multilayered Composites Produced by Accumulative Roll Bonding, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 15-21, 2011.
- [34] N. Lukaschkin, A. Borissow, A. Erlikh, The system analysis of metal forming technique in welding processes, *Journal of materials processing technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 264-269, 1997.
- [35] H.-Y. Wu, S. Lee, J.-Y. Wang, Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, No. 1, pp. 173-179, 1998.
- [36] H. Le, M. Sutcliffe, P. Wang, G. Burstein, Surface oxide fracture in cold aluminium rolling, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 4, pp. 911-920, 2004.
- [37] D. Rahmatabadi, A. Shahmirzaloo, M. Farahani, R. Hashemi, Characterization of the Plastic and Elastic Properties of Aluminum Sheet Produced by CRB Process via DIC Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 505-513, 2019. eng
- [38] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, G. Faraji, Microstructure and mechanical properties of Al/Cu/Mg laminated composite sheets produced by the ARB proces, *International Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 32-37, 2000.
- [15] A. Yahiro, T. Masui, T. Yoshida, D. Doi, Development of Nonferrous Clad Plate and Sheet by Warm Rolling with Different Temperature of Materials, *ISIJ international*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-654, 1991.
- [16] H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, Cold roll bonding of 5754-aluminum strips, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002.
- [17] D. Pan, K. Gao, J. Yu, Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips, *Materials science and technology*, Vol. 5, No. 9, pp. 934-939, 1989.
- [18] W. Zhang, N. Bay, Influence of different surface preparation methods on the bond formation in cold pressure welding, *Proceed. Eurojoin 2*, 379-388, 1994.
- [19] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip, *Materials science and technology*, Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, 2004.
- [20] H. Mohamed, J. Washburn, Mechanism of solid state pressure welding, *Welding J*, Vol. 55, pp. 302s-310s, 1975.
- [21] J. Hu, Z. Marciniak, J. Duncan, *Mechanics of sheet metal forming*: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [22] Y. H. Chung, J. W. Park, K. H. Lee, Controlling the Thickness Uniformity in Equal Channel Angular Rolling (ECAR), *Materials Science Forum*, Trans, Vol. 539-543, pp. 2872-2877, 2007.
- [23] H.-C. Tseng, C. Hung, C.-C. Huang, An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 9-12, pp. 1029-1036, 2010.
- [24] A. Atrian, F. Fereshteh-Saniee, Deep drawing process of steel/brass laminated sheets, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 47, pp. 75-81, 2013.
- [25] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. M. Dariani, Influences of material properties of components on formability of two-layer metallic sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5-8, pp. 809-823, 2013.
- [26] A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, M. R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, 2015.
- [27] F. Dehghani, M. Salimi, Analytical and experimental analysis of the formability of copper-stainless-steel 304L clad metal sheets in deep drawing, *The International Journal of Advanced*

- Scripta materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- [48] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
- [49] M. Alizadeh, M. Paydar, Fabrication of nanostructure Al/SiC P composite by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 492, No. 1, pp. 231-235, 2010.
- [50] S. Amirkhanlou, M. R. Rezaei, B. Niroumand, M. R. Toroghinejad, Refinement of microstructure and improvement of mechanical properties of Al/Al₂O₃ composite by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 6, pp. 2548-2553, 2011.
- [51] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaee, Experimental evaluation of the plane stress fracture toughness for ultra-fine grained aluminum specimens prepared by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 708, pp. 301-310, 2017.
- [52] M. Naseri, M. Reihanian, E. Borhani, Bonding behavior during cold roll-cladding of tri-layered Al/brass/Al composite, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp. 125-137, 2016.
- [53] M. Tayyebi, D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Review of mechanical and microstructural properties of aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles produced by SPD processes, *Journal of Science and Technology of Composites*, 2018.
- [54] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, A. Sheikhi, R. Hashemi, Fracture toughness investigation of Al1050/Cu/MgAZ31ZB multi-layered composite produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 734, pp. 427-436, 2018.
- [55] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, G. Faraji, Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Multilayer Al5052-Cu Composite Produced by Accumulative Roll Bonding, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 57, No. 3, pp. 144-153, 2018.
- Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 564-572, 2018.
- [39] D. Rahmatabadi, M. Tayyebi, R. Hashemi, B. Eghbali, Investigation of mechanical properties and microstructure for Al/Cu/SiC composite produced by Cross Accumulative Roll Bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 180-184, 2017.
- [40] D. Rahmatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. S. Shojaee, An experimental survey of fracture toughness for nano/ultra-fine grained Al5052/Cu multi-layered composite processed by the accumulative roll bonding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018.
- [41] L. Ghalandari, M. M. Mahdavian, M. Reihanian, M. Mahmoudiniya, Production of Al/Sn multilayer composite by accumulative roll bonding (ARB): A study of microstructure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 661, pp. 179-186, 2016.
- [42] D. Rahmatabadi, M. Pahlavani, A. Bayati, R. Hashemi, J. Marzbanrad, Evaluation of fracture toughness and rupture energy absorption capacity of as-rolled LZ71 and LZ91 Mg alloy sheet, *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 3, 2019.
- [43] M. Shaarbaaf, M. R. Toroghinejad, Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1, pp. 28-33, 2008.
- [44] R. Jamaati, S. Amirkhanlou, M. R. Toroghinejad, B. Niroumand, Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 4, pp. 2143-2148, 2011.
- [45] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, High-strength and highly-uniform composite produced by anodizing and accumulative roll bonding processes, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 10, pp. 4816-4822, 2010.
- [46] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 16, pp. 4146-4151, 2010.
- [47] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. Hong, Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process,