



بررسی خواص مکانیکی و چقرمگی شکست کامپوزیت سه لایه آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

محمد دلشاد غلامی¹، داود رحمت آبادی²، تقی شجاعی³، رامین هاشمی^{4*}، بیژن محمدی⁵

1- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

4- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

5- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 1399/06/21

پذیرش: 1400/03/30

کلیدواژگان:

پیوند سرد نوردی

چقرمگی شکست

خواص مکانیکی

کامپوزیت لایه‌ای

در چند سال اخیر، ساخت ورق های کامپوزیتی لایه‌ای به روش پیوند نوردی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق، به بررسی خواص مکانیکی و چقرمگی شکست ورق کامپوزیتی سه لایه آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی پرداخته شد. خواص مکانیکی و سطح مقطع شکست نمونه‌ها به ترتیب به وسیله آزمایش کشش تک‌محوره، آزمایش سختی و میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. همچنین چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای به صورت تجربی اندازه گیری شد. مشاهده شد استحکام کششی برای نمونه کامپوزیتی نسبت به آلومینیوم و مقادیر میکروسختی و چقرمگی شکست نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش یافته است. اعمال کار سرد را می‌توان دلیل اصلی افزایش سختی و چقرمگی دانست و علت افت استحکام کامپوزیت نسبت به منیزیم، ایجاد ناپایداری پلاستیکی در تقویت‌کننده منیزیم به دلیل اعمال کرنش بالا است. همچنین نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترون روبشی نشان داد که مکانیزم شکست برای لایه آلومینیوم نرم و برای منیزیم ترد است و سطح مقطع شکست در لایه آلومینیوم نسبت به آلومینیوم اولیه، دارای میکروحفرات کم عمق تر و کوچک تر می‌باشد، که نشان‌دهنده شکست نرم برشی است.

Evaluation of Mechanical Properties and Fracture Toughness of Aluminum-Magnesium-Aluminum Composite Produced by Cold Roll Bonding process

Mohammad Delshad Gholami¹, Davood Rahmatatabadi², Taghi Shojaei¹, Ramin Hashemi^{1*}, Bijan Mohammadi¹

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

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

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

Keywords

Cold Roll Bonding
Fracture Toughness
Mechanical Properties
Layered Composite

Abstract

In the last few years, researchers have been interested in the fabrication of laminated composite sheets. In this research, mechanical properties and fracture toughness of three-layer aluminum-magnesium-aluminum composite sheet produced by cold-rolling bonding method were investigated. Mechanical properties and fracture cross-sections of the specimens were studied by uniaxial tensile test, hardness test and scanning electron microscopy, respectively. It was observed that the tensile strength of composite specimens was higher than that of aluminum and the microhardness and fracture toughness values were increased compared to the initial specimens. High applied cold work can be the main reason for the increase in hardness and fracture toughness, and the reason for the decrease in composite strength over magnesium is the creation of plastic instability in the magnesium reinforcer due to the high strain. The results of scanning electron microscopy also show that the fracture mechanism is for the soft aluminum layer and for the crisp magnesium and the surface of the fracture cross section in the aluminum layer has a shallower and smaller micropores, indicating shear ductile fracture.

1- مقدمه

با خواص مکانیکی بالا بیش‌تر شده است. انتخاب یک ماده در سازه‌های

مهندسی باید متناسب با نوع کارکرد و موقعیت به‌کارگیری آن ماده باشد. در

امروزه با توجه به پیشرفت‌های چشم‌گیر در زمینه‌ی علوم مهندسی نیاز به مواد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Delshad Gholami, M., Rahmatatabadi, D., Shojaei, T., Hashemi, R., and Mohammadi, H., "Evaluation of Mechanical Properties and Fracture Toughness of Aluminum-Magnesium-Aluminum Composite Produced by Cold Roll Bonding process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1317-1326, 2021.

از هرگونه اکسید سطحی در تماس با یکدیگر قرار گیرند بدون غلبه بر مانع انرژی اتصالی صورت نمی‌گیرد [7-9]. بر اساس تحقیقات انجام شده علت این مانع انرژی دافعه‌ی دوام فلز متقابل در حین نزدیک شدن به یکدیگر هست و در واقع با صرف انرژی، این دوام به فاصله معین جهت ایجاد پیوند فلزی می‌رسند [10]. عوامل زیادی نظیر: ضخامت ورق اولیه [4]، درصد کاهش ضخامت و آنیل قبل و بعد از نورد [5]، زمان و دمای آنیل [11]، عملیات حرارتی بین پاس‌ها [12]، درصد کرنش [13]، ذرات تقویت‌کننده و مقدار آن [14] سرعت و جهت نورد [15، 16]، آماده‌سازی سطح [4] و ساختار کریستالی فلزات [5، 17] بر روی کیفیت اتصال در پیوند سرد نوردی موثر است.

چقرمگی شکست یکی از پارامترهای مهم در طراحی و شکست اجزای مکانیکی است که کم‌تر در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است. چقرمگی شکست، قابلیت مواد در جذب انرژی قبل از شکست را نشان می‌دهد که بررسی آن در قطعات داری ترک به منظور پیش‌بینی عمر قطعه حایز اهمیت است. استحکام شکست در حالت تنش صفحه‌ای علاوه بر اینکه تابع ضخامت است، تابع درجه حرارت و نرخ بارگذاری نیز می‌باشد. همچنین مقادیر آن می‌تواند با تغییر طول اولیه ترک نیز تغییر نماید. منحنی R^2 یکی از روش‌های تجربی پرکاربرد برای تعیین مقاومت شکست مواد در طی رشد آرام و پایدار ترک است [3، 7، 8، 18]. این روش چگونگی افزایش استحکام به شکست را با افزایش بار وارده به نمونه ترک دار طی رشد آرام ترک در حالت تنش صفحه‌ای ترسیم می‌کند [18]. در واقع منحنی R بیانگر تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب طول ترک است. در این تحقیق، برای اولین بار چقرمگی شکست کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین خواص مکانیکی، سطح مقطع شکست و اتصال لایه‌ها نمونه کامپوزیتی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به ترتیب با استفاده از کشش تک محوره⁴، میکروسختی ویکرز⁵، میکروسکوپ الکترونی روبشی⁶ و میکروسکوپ نوری⁷ بررسی شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلومینیوم و منیزیم اولیه

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of primary aluminum and magnesium

ماده	ترکیب شیمیایی (wt. %)	میکرو سختی (HVN)	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (MPa)
آلومینیوم 1050	99.44 Al, 0.406Fe, 0.121Si, 0.033Cu	24	55	59
منیزیم AZ31	95.9 Mg, 3Al, 1Zn, 0.1Mn	60	18	159

سال‌های اخیر کامپوزیت‌های لایه‌ای بیش از گذشته در کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. بنابراین تحقیقات بسیار زیادی روی نحوه ساخت و تولید کامپوزیت‌های فلزی چندلایه به علت بالا بودن نسبت استحکام به وزن و خواص مکانیکی مناسب انجام شده است. هرچند از فلزات و آلیاژهای متنوعی می‌توان به‌عنوان زمینه استفاده کرد ولی آلیاژهای سبک و استحکام بالا به دلیل افزایش بازدهی مواد مناسب‌تری محسوب می‌شوند. آلومینیوم پس از فولاد مهم‌ترین و پر مصرف‌ترین فلز دنیا است و کاربرد آن در صنایع مختلف روزه‌روز افزایش یافته است. قیمت کم و دانسته پایین این فلز در مقایسه با آلیاژهای سبک دیگر مانند منیزیم و تیتانیوم سبب شده است محققین توجه ویژه‌ای به استفاده از آن در ساخت انواع ورق‌های چندلایه و کامپوزیت‌های زمینه فلزی داشته باشند. همچنین منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا در صنعت به خصوص صنایع خودروسازی و هوافضا کاربردهای زیادی دارد. از خواص دیگر منیزیم می‌توان به قابلیت ماشین‌کاری خوب، مقاومت به خوردگی و خزش عالی اشاره کرد. منیزیم با خلوص 99 درصد به ندرت کاربرد مهندسی دارد لذا از آن به صورت آلیاژی استفاده می‌شود. آلیاژهای منیزیم سری AZ مانند AZ31 و AZ91 در ترکیب شیمیایی آن‌ها سه عنصر اصلی منیزیم، آلومینیوم و روی بیشترین درصد را دارد. در میان آلیاژهای منیزیم، آلیاژ AZ31 به علت استحکام و داکتیلیته مناسب بیش تر مورد توجه محققان و صنعت‌گران واقع شده است [2]. محدودیت‌های استفاده از منیزیم مربوط به قیمت بالای آن و شکل‌پذیری بسیار پایین در دمای محیط است. با توجه به مطالب گفته شده کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم به دلیل خواص مطلوب دو فلز می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودروسازی داشته باشد.

در سال‌های اخیر از بین روش‌های موجود برای ساخت کامپوزیت لایه‌ای، روش پیوند سرد نوردی¹ به دلیل ساده بودن فرایند و عدم نیاز به تجهیزات گران‌قیمت بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است [3]. این روش که در دسته روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک² قرار می‌گیرد، به دلیل خواص منحصر به فرد آن نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک بیش تر توسعه یافته است [4]. در حال حاضر چهار تئوری برای توجیه مکانیزم اتصال اتم به اتم در فلزات در حین جوش سرد ناشی از اعمال فشار ارائه شده است که عبارتند از تئوری لایه‌نازک، تئوری سد انرژی، تئوری اتصال نفوذی و تئوری اتصال تبلور مجدد [4]. در مبحث نورد در دمای محیط و دمای کمتر از تبلور مجدد فلز دو تئوری لایه‌نازک [4] و تئوری سد انرژی [5] مطرح می‌باشند.

تحقیقات نشان داده است که در فرایند پیوند نوردی سرد به علت پایین بودن دما، تئوری لایه‌نازک مکانیزم اصلی در برقراری پیوند است و اتصال زمانی می‌تواند بین دو ورق برقرار شود که تغییر شکل به‌اندازه‌ی کافی بزرگ باشد و سطح دو ورق در تماس با یکدیگر قرار گیرد. شکست لایه سطحی کار سخت شده، یا لایه‌ی اکسیدی تشکیل شده و بیرون آمدن فلز بکر زیرین از بین ترک‌ها نقش اساسی در ایجاد پیوند فلزی را دارد [4]. به‌عبارت‌دیگر اتصال بین دو فلز هنگامی حاصل می‌شود که در اثر تغییر شکل پلاستیک لایه اکسید ترد در سطح دو فلز شکسته شود و فلز زیر اکسید نمایان شود. این دو فلز تمیز در مجاورت با یکدیگر و در اثر اعمال نیروی عمودی نورد پیوند فلزی تشکیل می‌دهند [5، 6]. همچنین طبق تئوری سد انرژی، برای ایجاد جوش یک مانع انرژی وجود دارد که باید بر آن غلبه نمود. زیرا حتی اگر سطوح تمیز و عاری

⁵ Scanning Electron Microscopy (SEM)

⁶ Optic Microscopy (OM)

¹ Cold Roll Bonding (CRB)

² Severe Plastic Deformation (SPD)

³ R Curve

⁴ Uni-axial tensile test

2- روش تحقیق

در این تحقیق از ورق آلومینیوم خالص تجاری با ضخامت 0.5 میلی متر و منیزیم آلیاژی AZ31 با ضخامت 1 میلی متر استفاده شد. ویژگی‌ها و خواص مکانیکی آلومینیوم 1050 و منیزیم AZ31 استفاده شده در جدول 1 ارائه شده است. نمونه‌های اولیه آلومینیوم و منیزیم در ابعاد 160 میلی متر طول و 60 میلی متر عرض بریده شد. مهم‌ترین قسمت فرایند پیوند سرد نوردی مرحله آماده‌سازی است. به گونه‌ای که چنانچه این مرحله درست انجام نشود امکان اتصال پیوند بین سطوح ورق وجود نخواهد داشت و فرایند انجام نمی‌شود. لذا این مرحله باید با دقت بسیار زیادی انجام شود. برای این منظور، ابتدا باید سطح ورق از هرگونه چربی و آلودگی پاک شود. لذا ورق‌ها به مدت 10 دقیقه در استون صنعتی قرار داده شد. سپس به منظور اتصال بهتر بایستی اکسید سطحی حذف گردد. برای این امر و اطمینان از حذف شدن آلودگی‌های سطحی، با استفاده از برس سیمی فولادی که به دستگاه دریل دستی بسته می‌شود، سطح ورق‌ها کاملاً برس زده شدند. در ادامه ورق‌ها روی هم گذاشته شدند و به منظور جلوگیری از سر خوردن و لغزش آن‌ها زیر غلطک‌های نورد، چهار گوشه آن را با مته به قطر 0.5 میلی متر سوراخ و با استفاده از سیم مسی نازک به هم محکم بسته شدند. بدین ترتیب نمونه اولیه برای عملیات پیوند سرد نوردی آماده شد. باید توجه داشت به دلیل اکسید شدن سطح ورق‌ها پس از برس زنی و آماده‌سازی، بهتر است مراحل فوق سریع انجام شود. این عملیات به وسیله نورد آزمایشگاهی شامل دو غلطک با قطر 200 میلی متر و موتوری به قدرت 15 اسب بخار که توانایی ایجاد سرعت حداکثر 40 دور بر دقیقه را داشت، در دمای اتاق و بدون استفاده از روانکار انجام شد. شکل 1 شماتیک فرایند پیوند سرد نوردی را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن نمودار تنش کرنش و سایر خواص مکانیکی مربوط به آن آزمون کشش تک‌محوره انجام شد. برای این منظور سه نمونه تست کشش در جهت نورد، بر اساس استاندارد ASTM E8M-9 با استفاده از دستگاه وایرکات تهیه شد. تست کشش با استفاده از دستگاه SANTAM در دمای اتاق، با نرخ کرنش 1×10^{-4} بر ثانیه انجام شد. همچنین جهت اندازه‌گیری سختی لایه‌های کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم و مواد اولیه از تست میکروسختی ویکرز استاندارد ASTM E384 استفاده شد. برای این کار نمونه‌های مانت شده در راستای ضخامت که سطح آن‌ها سنباده و پولیش شده بود، زیر دستگاه میکروسختی JENUS قرار داده شد و با اعمال بار 200 گرم و مدت‌زمان 10 ثانیه یک اثر لوزی شکل روی قطعه ایجاد شد و با اندازه‌گیری قطرهای لوزی میزان سختی ویکرز محاسبه گردید. برای کاهش درصد خطا، این تست در 6 نقطه مختلف از نمونه انجام و میانگین اعداد به‌عنوان سختی نهایی ماده مورد نظر ثبت شد.

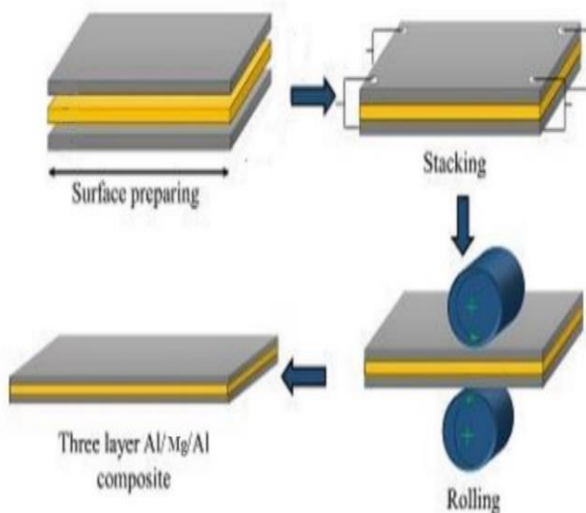


Fig. 1 Schematic illustration of CRB process

شکل 1 شماتیک فرایند پیوند سرد نوردی

در ادامه به منظور مطالعه چگونگی اتصال لایه‌ها و نوع شکست نمونه‌ها، سطح مقطع شکست آن‌ها پس از تست کشش تک‌محوره با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA TUSCAN مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این از میکروسکوپ نوری برای بررسی ناپایداری پلاستیکی در لایه منیزیم و چگونگی اتصال لایه‌ها استفاده شد. عملیات آماده‌سازی نیز با استفاده از سنباده‌هایی با اندازه 200 تا 5000 و پولیشینگ با محلول آب، صابون، الکل و آلومینا با ذرات کمتر 3 میکرون انجام شد.

به منظور بررسی چقرمگی شکست نمونه‌های آلومینیوم خالص، منیزیم AZ31 و کامپوزیت سه لایه تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، از هر ورق سه نمونه تست چقرمگی بر اساس استاندارد ASTM E647 با استفاده از ماشین وایرکات تهیه شد. شکل 2 ابعاد و نقشه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، بر اساس مطالعات محققین گذشته [16, 17] برای شبیه سازی شرایط رشد ترک نیاز به ایجاد یک شیار بسیار باریک به اندازه 0.5 میلی متر است. نکته مهم رعایت کردن نسبت a_0/W یکسان برای همه نمونه‌ها است که در این تحقیق این نسبت 0.4 در نظر گرفته شد. مقدار چقرمگی شکست با استفاده از روش منحنی R، محاسبه شده است. مقدار رشد ترک با استفاده از دوربین اندازه‌گیری و با تبدیل به تصاویر و استفاده از نرم‌افزار، مقدار رشد ترک در زمان‌های مختلف محاسبه شد و نیروهای متناظر با مقدار رشد ترک نیز با استفاده از داده‌های دستگاه کشش، استخراج شد و با استفاده از معادلات زیر مقدار چقرمگی شکست و منحنی نیروهای ثابت ترسیم شد تا بر اساس استاندارد مربوطه مقدار چقرمگی شکست برای مواد اولیه و کامپوزیت تولید شده از نقطه تماس منحنی‌ها بدست آید.

با توجه به اینکه نمونه ها برای بدست آوردن چقرمگی شکست در مود اول هست، لذا بارگذاری به صورت شبه استاتیکی با سرعت 0.5 میلی متر بر دقیقه و با استفاده از دستگاه کشش در دمای محیط انجام شد. شکل 4 نمونه قبل و بعد از آزمون چقرمگی شکست را نشان می دهد.

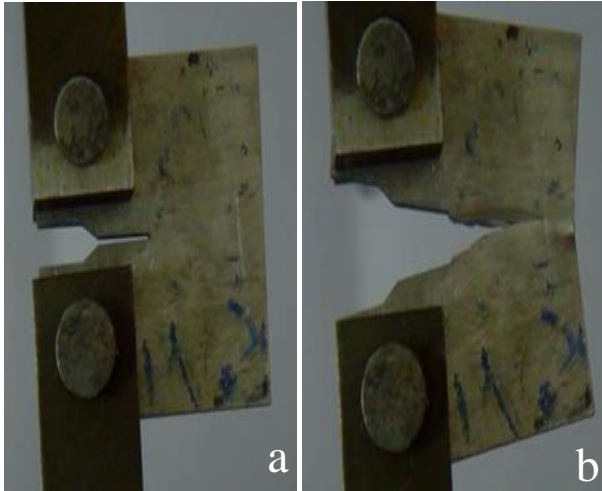


Fig. 4 Sample a) before and b) after fracture toughness test

شکل 4 نمونه (a) قبل و (b) بعد از آزمون چقرمگی شکست

3- نتایج و بحث 1-3- خواص مکانیکی

شکل 5 نمودار تنش کرنش مهندسی برای نمونه کامپوزیت سه لایه، آلومینیوم و منیزیم اولیه نشان می دهد. همان طور که مشخص است، استحکام کششی کامپوزیت ساخته شده به روش پیوند سرد نوردی از ورق آلومینیوم 1050 اولیه بیش تر و از منیزیم AZ31 اولیه کم تر است. مقدار استحکام کششی کامپوزیت سه لایه حدود 107 مگاپاسکال ثبت شد که نسبت به آلومینیوم (با استحکام کششی 59 مگاپاسکال) 85 درصد افزایش و نسبت به منیزیم (با استحکام کششی 159 مگاپاسکال) حدود 33 درصد کاهش داشته است. همچنین مقدار ازدیاد طول برای نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه آلومینیوم و منیزیم اولیه کاهش یافته است. علت این تغییرات در استحکام کششی و ازدیاد طول می تواند به دلیل کار سختی ایجاد شده در اثر افزایش چگالی نابعایی ها حاصل از اعمال کرنش شدید به نمونه باشد [5, 19].

همچنین شکل 6 نمودار تغییرات میکروسختی بر حسب ویکرز برای نمونه های اولیه و لایه های کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، پس از فرایند پیوند نوردی، میکروسختی برای هر دو لایه آلومینیوم و منیزیم به شدت افزایش یافته است. این افزایش شدید به دلیل میزان بالای افزایش چگالی نابعایی ناشی از کرنش سختی می باشد [20, 21].

$$k_{r_i} = \frac{P_i}{b\sqrt{w}} \times f_i\left(\frac{a}{w}\right)$$

$$f_i\left(\frac{a}{w}\right) = \left[\frac{2 + \frac{a}{w}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{w}\right) - 13.32\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{w}\right)^4 \right]$$

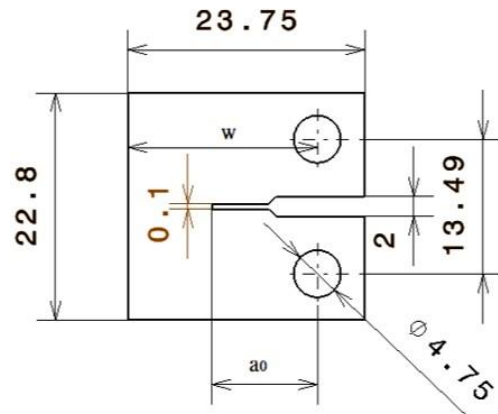


Fig. 2 Dimensions of toughness test specimens

شکل 2 ابعاد و نقشه نمونه های تست چقرمگی

به منظور انجام آزمایش با دستگاه کشش، نیاز به قید و بند و پین هایی است که به کمک آن ها نمونه ها نگه داشته شوند. همچنین لازم است این قیود کاملاً صلب بوده و به گونه ای باشند که در حین بارگذاری تغییر شکل نداده و باعث بروز خطا در نتایج نشود. قید و بند بر طبق استاندارد ASTM E399 برای نمونه های چقرمگی شکست، انتخاب طراحی و ساخته شد. شکل 3 شماتیک قرار گرفتن نمونه ها و قید و بند ساخته شده را نشان می دهد.

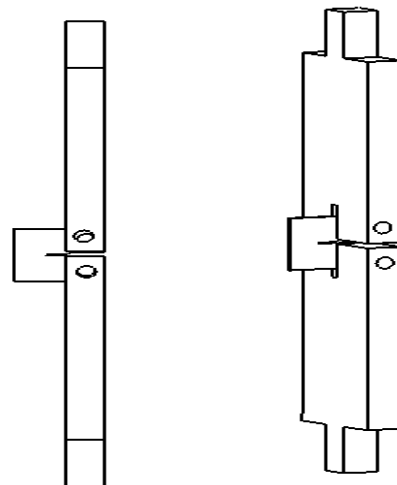


Fig. 3 Schematic of how the toughness test specimen is fitted into the mold

شکل 3 شماتیک نحوه قرار گرفتن نمونه تست چقرمگی در قید و بند

3-2- شکست نگاری

در این قسمت، مقطع شکست ورق‌های اولیه و نمونه فرآوری شده به روش پیوند سرد نوردی بعد از انجام آزمون کشش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های 7 و 8 به ترتیب سطح مقطع شکست آلومینیوم 1050 و منیزیم AZ31 اولیه را نشان می‌دهند. مکانیزم غالب شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکز دار² (مانند آلومینیوم) هستند، تشکیل حفره و سپس شکست نرم است. پدیده‌ی شکست نرم در مواد با چگالی نابجایی پایین در مرزدانه‌ها رخ می‌دهد که سطح شکست در آن‌ها با حفره‌هایی به شکل نیمه کره‌ی مشاهده می‌گردد [6, 22, 23]. در هنگام تست کشش مواد دارای شکست نرم، دانه‌های ماده شروع به کشیدگی در راستای کشش کرده و با افزایش کشش در دانه‌ها حفره‌های کوچکی پدیدار می‌شود که با پیوستن این حفره‌ها به یکدیگر دانه‌های کشیده شده از سطح جدا شده و حفره‌های عمیقی را ایجاد می‌کنند که نشان از شکست نرم است [24]. به عبارت دیگر شکست نرم به صورت میکرو حفرات هم‌محور یا نیم‌کره‌ای ظاهر می‌شود. این نوع شکست با تشکیل میکرو حفرات، پیوستگی، انتشار ترک و سپس شکست برشی رخ می‌دهد [24].

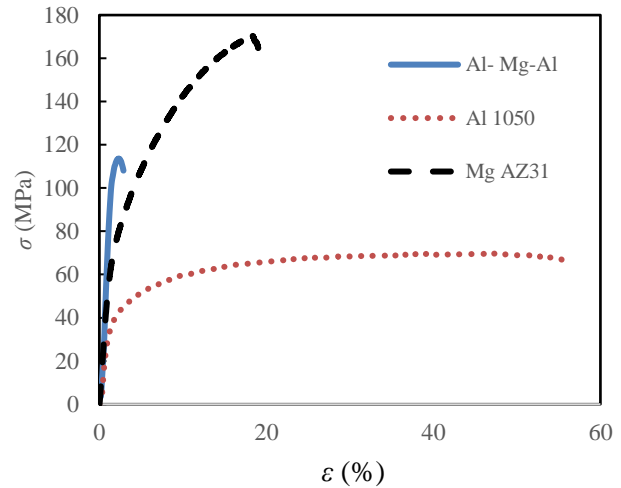


Fig. 5 Engineering strain stress curve for three-layer composite, Aluminum and Magnesium

شکل 5 منحنی تنش کرنش مهندسی برای نمونه کامپوزیت سه لایه، آلومینیوم و منیزیم اولیه

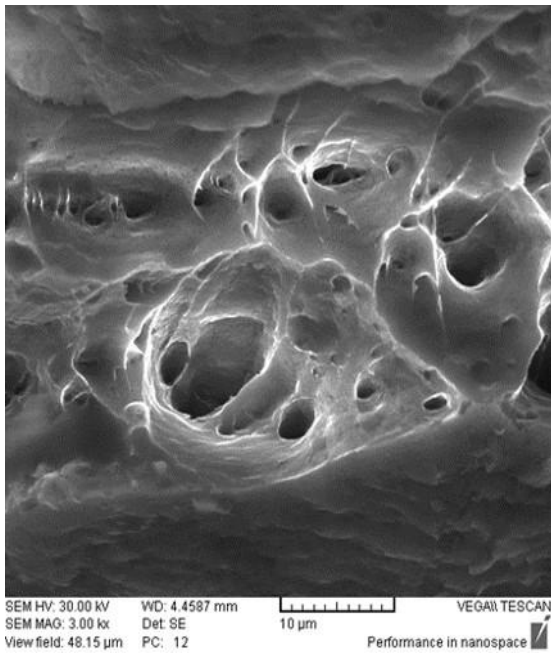


Fig. 7 Tensile fracture surfaces of initial sample Al 1050

شکل 7 سطح مقطع شکست نمونه آلومینیوم 1050 اولیه

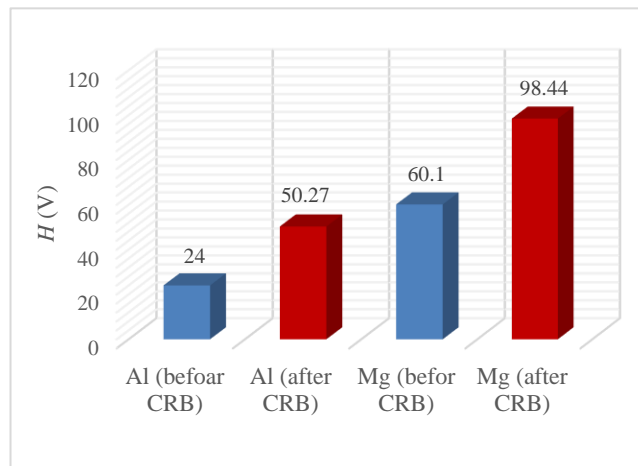


Fig. 6 Micro hardness changes for Al and Mg before and after CRB

شکل 6 تغییرات میکروسختی برای آلومینیوم و منیزیم قبل و بعد از پیوند سرد نوردی

در شکل 6، مقدار میکروسختی برای لایه‌های آلومینیوم و منیزیم در کامپوزیت تولید شده و قبل از نورد ارائه شده است. با مقایسه میکروسختی لایه‌ها قبل و بعد از فرایند پیوند سرد نوردی می‌توان اثر تقویت‌کنندگی نورد بر روی مقدار میکروسختی لایه‌ها را مشاهده کرد. این مقدار افزایش برای لایه‌های آلومینیوم 109% و برای منیزیم 64% ثبت شد. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی می‌تواند به ساختار متفاوت آلومینیوم و منیزیم و همچنین تفاوت در انرژی نقص چیدمان¹ آن‌ها مربوط باشد. همچنین اعمال کار سرد و کرنش بالا دلیل اصلی افزایش میکروسختی برای هر دو لایه آلومینیوم و منیزیم است.

² Face Center Cubic (FCC)

¹ Stacking Fault Energy

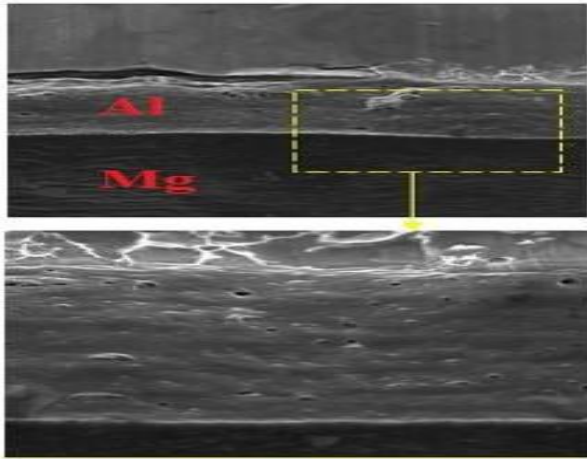


Fig. 9 Tensile fracture surfaces of three-layer Al / Mg / Al composite produced by CRB

شکل 9 سطح مقطع شکست کامپوزیت سه لایه Al/Mg/Al تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

در شکل 10 تصویر میکروسکوپ نوری لایه‌های کامپوزیت نشان داده شده است. همان‌طور که در قبل ذکر شد، منیزیم در دمای پایین شکل‌پذیری بسیار پایینی دارد. با توجه به اینکه در فرایند پیوند نوردی حداقل 50 درصد کاهش ضخامت به نمونه اعمال می‌شود، تشکیل باند برشی³ شدید و شکست لایه منیزیم دور از انتظار نیست که در شکل 10، این نواحی مشخص شده است.



Fig. 10 Optical microscope image of Al / Mg / Al composite layers with shear bands

شکل 10 تصویر میکروسکوپ نوری از لایه‌های کامپوزیت Al/Mg/Al به همراه باند های برشی تشکیل شده

3-3- چقرمگی تنش شکست صفحه ای

چقرمگی شکست تنش صفحه ای به عنوان یک پارامتر اساسی برای مواد نوین مانند فلزات و کامپوزیت‌های لایه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و به همین منظور در سالیان اخیر این پارامتر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای معمولاً با دو روش منحنی R و انتگرال جی محاسبه می‌شود. در این مقاله از روش منحنی R برای بررسی تجربی چقرمگی شکست

بر خلاف آلومینیوم، شکست در منیزیم به دلیل ساختار کریستالی شش وجهی¹ به صورت شکست ترد² خواهد بود. شکل 8 سطح مقطع شکست منیزیم AZ31 را نشان می‌دهد.

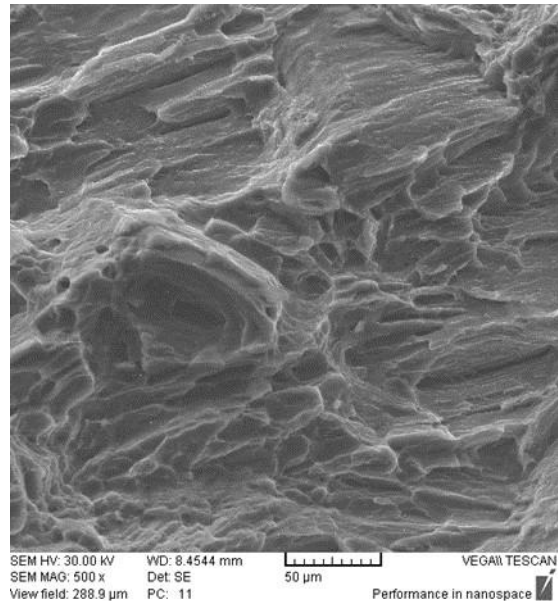


Fig. 8 Tensile fracture surfaces of initial sample Mg AZ31

شکل 8 سطح مقطع شکست نمونه منیزیم AZ31 اولیه

واضح است که در مورد کامپوزیت لایه ای آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم به دلیل ساختارهای کریستالی و مکانیزم شکست متفاوت دو فلز، ترکیبی از شکست نرم و ترد وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، به علت وجود فلزات غیر مشابه، کرنش پلاستیک اعمالی ناشی از فرایند باعث بروز شکست نرم در لایه های آلومینیوم و شکست ترد در لایه منیزیم می‌شود. غالب بودن هر یک از مکانیزم‌ها بستگی به درصد حجمی ورق‌ها در کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی دارد. شکل 9 سطح مقطع شکست نمونه کامپوزیت سه لایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، شکل 9 نشان‌دهنده ترکیبی از مناطق برشی و حفره‌های عمیق است. همواره باید به خاطر داشت که ماده ترد کامل یا نرم مطلق نیست بلکه ترکیبی از این دو است و با بررسی میزان عمق حفره‌ها و نسبت مناطق برشی به مقدار حفره‌ها می‌توان تخمینی از نحوه شکست داشت. وجود میکروحفرات کم‌عمق‌تر و کوچک‌تر در نمونه‌ی کامپوزیت تولیدی نشان می‌دهد که نوع شکست نرم برشی شبیه به شکست در ورق آلومینیوم اولیه است با این تفاوت که حفره‌ها کم‌عمق‌تر هستند. در واقع هر حفره نماینده‌ی یک مکان‌جوانه‌زنی ترک است که به فرایند تغییر شکل پلاستیک نسبت داده شده است [23].

¹ Shear bands

¹ Hexagonal Close Pack (HCP)

² Brittle Fracture

شده است. همان‌طور که اشاره شده، نیرو و جابه‌جایی رشد ترک دو پارامتر اصلی در محاسبه چقرمگی شکست است که به ترتیب بیانگر مقاومت ماده در برابر رشد ترک و میزان تغییر شکل دهانه ترک هستند. طبق شکل 12، مشاهده می‌شود که مقاومت و استحکام آلیاژ منیزیم اولیه بیشتر از کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم تولید شده است. مقدار نیروی حداکثر برای آلومینیوم خالص تجاری، منیزیم آلیاژی AZ31 و کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، به ترتیب 179، 497 و 370 نیوتن است و مقاومت به شروع گسترش ترک در منیزیم به مراتب بیشتر از آلومینیوم خالص تجاری و کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم تولید شده با پیوند سرد نوردی است. این نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم اعمال کرنش بالا در حین نورد سرد، به دلیل وجود 66% آلومینیوم خالص تجاری در کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم، مقاومت ماده در برابر شروع ترک، کمتر از منیزیم آلیاژی است. از طرف دیگر مطابق با نتایج آزمون کشش نمونه‌های استاندارد، مقدار بازشدگی دهانه ترک در آلومینیوم خالص تجاری بسیار بیشتر از کامپوزیت تولید شده و منیزیم آلیاژی است که این نتایج به میزان تغییر شکل و پلاستیسیته ماده مرتبط است و به دلیل تفاوت قابل توجه در ساختار کریستالی و قابلیت شکل‌پذیری آلومینیوم خالص تجاری نسبت به منیزیم در دمای محیط قابل پیش‌بینی بود.

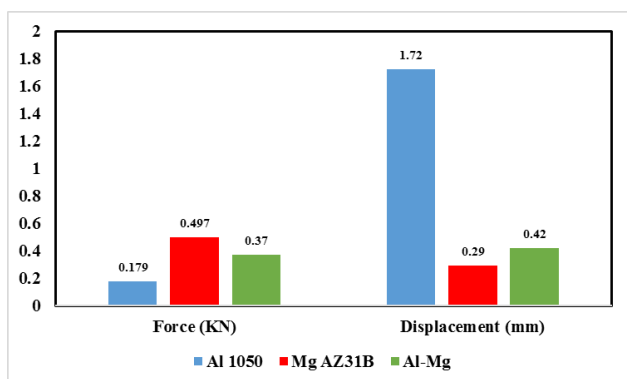


Fig. 12 Results of the CT standard tensile test

شکل 12 نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های استاندارد کششی فشرده

به طور کلی، منیزیم به دلیل استحکام بیشتر در برابر گسترش ترک، مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد، هرچند که این مقاومت با کم‌ترین تغییر شکل و جابه‌جایی دهانه ترک اتفاق می‌افتد. نتایج آزمون کشش نیز به صورت کیفی و کمی تاییدکننده نتایج آزمون چقرمگی تنش صفحه‌ای می‌باشد و منیزیم دارای استحکام بیشتر و ازدیاد طول کمتر است. در شکل 13 و 14، منحنی R برای منیزیم آلیاژی و کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ارائه شده است. مطابق با این تصاویر، مقدار چقرمگی شکست از محل تماس منحنی R و نمودار چقرمگی در نیرو ثابت بدست می‌آید.

تنش صفحه‌ای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم و مواد اولیه آن (آلومینیوم خالص تجاری و منیزیم آلیاژی AZ31) استفاده شده است. در شکل 11، نمودار نیرو-جابه‌جایی برای نمونه‌های استاندارد کششی فشرده¹ کامپوزیت لایه‌ای ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این منحنی دارای دو ناحیه خطی و غیرخطی است. ناحیه خطی، از شروع بارگذاری تا شروع گسترش ترک است و معمولاً این ناحیه تا مقدار حداکثر نیروی بارگذاری برای نمونه کششی فشرده ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر، این ناحیه بیانگر مقاومت ماده در برابر آغاز گسترش ترک است و سطح زیر این ناحیه نیز، میزان انرژی جذب شده از شروع آزمون تا شروع رشد ترک مشخص می‌کند. علاوه بر این، چون در این ناحیه هنوز رشد ترک آغاز نشده است، کل میزان نیروی اعمالی صرف تغییر شکل دهانه ترک می‌شود و هر چقدر که میزان جابه‌جایی و تغییر شکل آن بیشتر باشد مقدار انرژی بیشتری صرف تغییر شکل دهانه ترک شده است [3]. مطابق با شکل 11، سه پله در ناحیه خطی نمودار نیرو-جابه‌جایی دهانه ترک برای کامپوزیت سه لایه آلومینیوم-منیزیم مشاهده می‌شود که علت آن وجود سه لایه از آلومینیوم و منیزیم با مقاومت به رشد ترک متفاوت است و رشد ترک در نمونه، زمانی شروع می‌شود که ترک در هر سه لایه رشد کرده باشد و به عبارت دیگر هر پله نشان‌دهنده مقاومت هر یک از سه لایه تشکیل دهنده کامپوزیت تولید شده می‌باشد. در کامپوزیت‌های لایه‌ای در ناحیه الاستیک رفتار ماده تابعی از مواد تشکیل‌دهنده می‌باشد و به دلیل تفاوت در خواص الاستیک لایه‌ها، نواحی خطی با شیب‌های مختلف مشاهده می‌شود. پس از ناحیه خطی (نیروی حداکثر)، رشد ترک همراه با افت نیرو است و این ناحیه نیز بیانگر مقاومت ماده در برابر گسترش ترک می‌باشد.

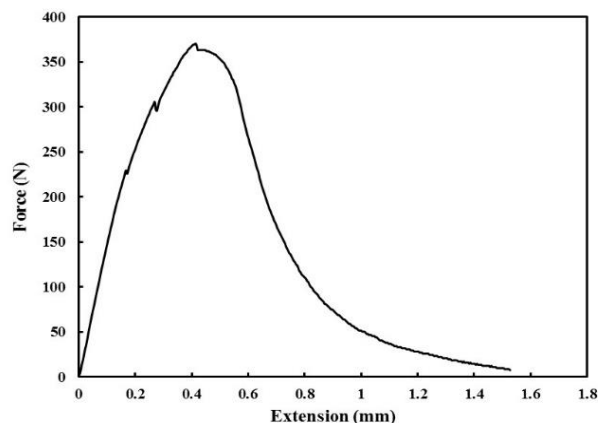


Fig. 11 Force Extension diagram for aluminum-magnesium-aluminum composite produced by CRB

شکل 11 نمودار نیرو-بازشدگی دهانه ترک برای کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

در شکل 12، نتایج آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای هر سه ماده (آلومینیوم، منیزیم و کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی) ارائه

¹ CT Sample

نظر می‌گیرد [3, 7, 8, 25]. همچنین آلومینیوم با تغییر شکل و جابه‌جایی بیشتر دهانه ترک، دارای کم‌ترین میزان چقرمگی و منیزیم نیز با بالاترین مقدار استحکام، دارای چقرمگی شکست کمتر از کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم است [7].

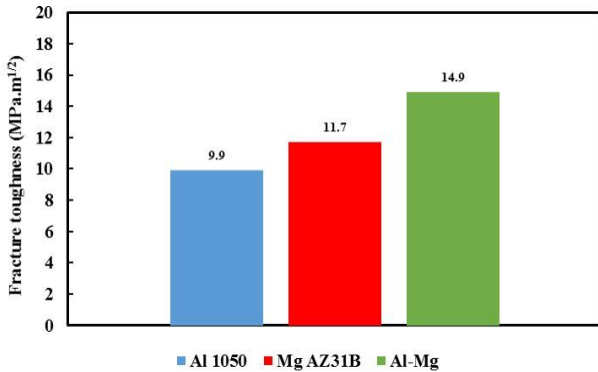


Fig. 15 The results of the R curve

شکل 15 نتایج حاصل از منحنی R

4-نتیجه گیری

در این تحقیق ورق سه لایه‌ای آلومینیوم/منیزیم/آلومینیوم با استفاده از روش پیوند سرد نوردی تولید شد و خواص مکانیکی و چقرمگی شکست آن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

1- نتایج تست کشش تک محوره نشان می‌دهد استحکام کششی کامپوزیت ساخته شده به روش پیوند سرد نوردی از ورق آلومینیوم 1050 بیش تر و از منیزیم AZ31 کم تر است که نسبت به آلومینیوم 85% افزایش و نسبت به منیزیم حدود 33% کاهش داشته است علت این تغییرات در استحکام کششی و ازدیاد طول می‌تواند به دلیل کار سختی ایجاد شده در اثر افزایش چگالی نایجایی‌ها حاصل از اعمال کرنش شدید به نمونه باشد.

2- پس از فرایند پیوند نوردی، میکروسختی برای هر دو لایه آلومینیوم و منیزیم به شدت افزایش می‌یابد. این مقدار برای آلومینیوم 109% و برای منیزیم 64% ثبت شد. افزایش شدید در میکروسختی به دلیل میزان بالای افزایش چگالی نایجایی ناشی از کرنش سختی می‌باشد.

3- تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشان می‌دهد در مورد کامپوزیت لایه ای آلومینیوم - منیزیم - آلومینیوم به دلیل ساختارهای کریستالی و مکانیزم شکست متفاوت دو فلز، ترکیبی از شکست نرم و ترد وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، به علت وجود فلزات غیر مشابه، کرنش پلاستیک اعمالی ناشی از فرآیند باعث بروز شکست نرم در لایه‌های آلومینیوم و شکست ترد در لایه منیزیم می‌شود. همچنین تصویر میکروسکوپ نوری از لایه‌ها نشان دهنده اتصال خوب بین منیزیم و آلومینیوم و تشکیل باند برشی در منیزیم به دلیل کرنش اعمالی شدید می‌باشد.

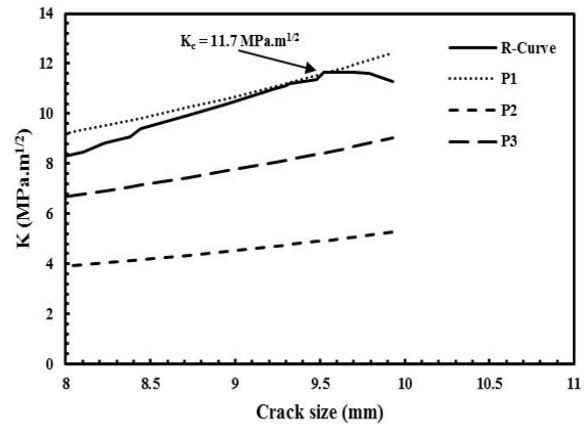


Fig. 13 R curve for magnesium alloy

شکل 13 منحنی R برای آلیاژ منیزیم

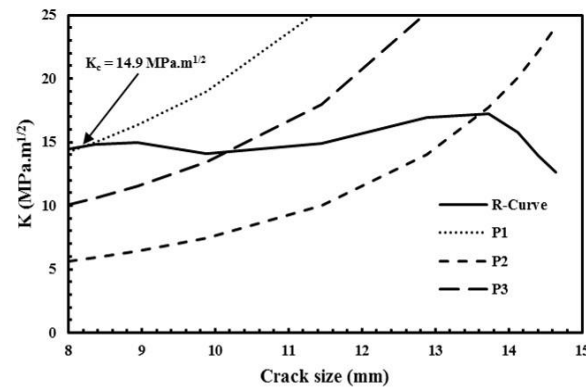


Fig. 14 R curve for aluminum-magnesium-aluminum composite

شکل 14 منحنی R برای کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم

در شکل 15، نتایج حاصل از محاسبه چقرمگی شکست با استفاده از منحنی R برای مواد اولیه (آلومینیوم خالص تجاری و منیزیم آلیاژی) و کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی ارائه شده است. مقدار چقرمگی شکست برای آلومینیوم خالص تجاری، منیزیم آلیاژی و کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم به ترتیب 9.9، 11.7 و 14.9 حاصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم، علی‌رغم این که مقدار نیروی حداکثر (مقاومت در برابر شروع گسترش ترک) و جابه‌جایی دهانه ترک، بسیار کمتری از مواد اولیه دارد، اما مقدار چقرمگی آن به ترتیب 1.51 و 1.27 برابر آلومینیوم خالص تجاری و منیزیم آلیاژی است.

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، مطابق با نتایج پیشین، مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای به هر دو پارامتر استحکام و شکل‌پذیری وابسته است و نتایج این تحقیق نیز بیانگر این موضوع است که برای دستیابی به چقرمگی شکست بالا، نیازمند بالا بودن هر دو پارامتر استحکام و شکل‌پذیری است و به نوعی چقرمگی شکست، هر دو پارامتر تغییر شکل پلاستیک و استحکام ماده را در

- 4- چقرمگی شکست تنش صفحه ای برای نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه اولیه آلومینیوم و منیزیم به ترتیب 50 و 27 درصد افزایش داشته است. در واقع کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم-آلومینیوم، علی‌رغم این که مقدار نیروی حداکثر (مقاومت در برابر شروع گسترش ترک) و جابه‌جایی دهانه ترک، بسیار کمتری از مواد اولیه دارد، اما مقدار چقرمگی آن به مراتب از نمونه‌های آلومینیوم و منیزیم بیش تر است چرا که مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای به هر دو پارامتر استحکام و شکل‌پذیری وابسته است.
- 5- مراجع**
- [1] Jamaati, R. and Toroghinejad, M. R., "Effect of Friction, Annealing Conditions and Hardness on the Bond Strength of Al/Al Strips Produced by Cold Roll Bonding Process" *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.
 - [2] Pahlavani, M., Marzbanrad, J., Rahmatabadi, D., Hashemi, R. and Bayati, A., "A Comprehensive Study on the Effect of Heat Treatment on the Fracture Behaviors and Structural Properties of Mg-Li Alloys Using Rsm" *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 7, 2019.
 - [3] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Mohammadi, B. and Shojaee, T., "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.
 - [4] Li, L., Nagai, K. and Yin, F., "Progress in Cold Roll Bonding of Metals" *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 9, No. 2, pp. 023001, 2008.
 - [5] Jamaati, R. and Toroghinejad, M., "Cold Roll Bonding Bond Strengths: Review" *Materials science and technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
 - [6] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Hashemi, R. and Faraji, G., "Microstructure and Mechanical Properties of Al/Cu/Mg Laminated Composite Sheets Produced by the Arb Process" *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 564-572, 2018.
 - [7] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Sheikhi, A. and Hashemi, R., "Fracture Toughness Investigation of Al1050/Cu/Mg₃Zn₃ Multi-Layered Composite Produced by Accumulative Roll Bonding Process" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 734, pp. 427-436, 2018.
 - [8] Rahmatabadi, D., Mohammadi, B., Hashemi, R. and Shojaee, T., "An Experimental Study of Fracture Toughness for Nano/Ultrafine Grained Al5052/Cu Multilayered Composite Processed by Accumulative Roll Bonding" *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 140, No. 10, 2018.
 - [9] Habibi, M., Hashemi, R., Fallah Tafti, M. and Assempour, A., "Experimental Investigation of Mechanical Properties, Formability and Forming Limit Diagrams for Tailor-Welded Blanks Produced by Friction Stir Welding" *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 310-323, 2018.
 - [10] Eizadjou, M., Manesh, H. D. and Janghorban, K., "Investigation of Roll Bonding between Aluminum Alloy Strips" *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008.
 - [11] Raei, M., Toroghinejad, M. R., Jamaati, R. and Szpunar, J. A., "Effect of Arb Process on Textural Evolution of Aa1100 Aluminum Alloy" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 26, pp. 7068-7073, 2010.
 - [12] Alizadeh, M., "Comparison of Nanostructured Al/B 4 C Composite Produced by Arb and Al/B 4 C Composite Produced by Rrb Process" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 2, pp. 578-582, 2010.
 - [13] Su, L., Lu, C., Tieu, A. K., Deng, G. and Sun, X., "Ultrafine Grained Aa1050/Aa6061 Composite Produced by Accumulative Roll Bonding" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 345-351, 2013.
 - [14] Alizadeh, M. and Paydar, M., "Study on the Effect of Presence of Tih 2 Particles on the Roll Bonding Behavior of Aluminum Alloy Strips" *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-86, 2009.
 - [15] Manesh, H. D. and Shahabi, H. S., "Effective Parameters on Bonding Strength of Roll Bonded Al/St/Al Multilayer Strips" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 476, No. 1-2, pp. 292-299, 2009.
 - [16] Jamaati, R. and Toroghinejad, M. R., "Investigation of the Parameters of the Cold Roll Bonding (Crb) Process" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2320-2326, 2010.
 - [17] Wu, K., Chang, H., Maawad, E., Gan, W., Brokmeier, H. and Zheng, M., "Microstructure and Mechanical Properties of the Mg/Al Laminated Composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding (Arb)" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 13-14, pp. 3073-3078, 2010.
 - [18] Rahmatabadi, D., Pahlavani, M., Bayati, A., Hashemi, R. and Marzbanrad, J., "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.
 - [19] Liu, C., Wang, Q., Jia, Y., Zhang, B., Jing, R., Ma, M., Jing, Q. and Liu, R., "Evaluation of Mechanical Properties of 1060-Al Reinforced with Wc Particles Via Warm Accumulative Roll Bonding Process" *Materials & Design*, Vol. 43, pp. 367-372, 2013.
 - [20] Tayyebi, M. and Eghbali, B., "Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Multilayer Cu/Ni Composite Processed by Accumulative Roll Bonding" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 759-764, 2013.
 - [21] Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M., Tayyebi, M. and Hashemi, R., "Characterizing the Elastic and Plastic Properties of the Multilayered Al/Brass Composite Produced by Arb Using Dic" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 753, pp. 70-78, 2019.
 - [22] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Tayyebi, M. and Bayati, A., "Investigation of Mechanical Properties, Formability, and Anisotropy of Dual Phase Mg-7li-1zn" *Materials Research Express*, 2019.
 - [23] Tayyebi, M., Rahmatabadi, D., Adhami, M. and Hashemi, R., "Influence of Arb Technique on the Microstructural, Mechanical and Fracture Properties of the Multilayered Al1050/Al5052 Composite Reinforced by Sic Particles" *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.
 - [24] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "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, 2019.
 - [25] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "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.

