



ارزیابی خواص الاستیک و پلاستیک کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با اتصال نوردی به روش همبستگی تصاویر دیجیتال

داود رحمت آبادی¹، علی شاه‌میرزالی²، مسلم طیبی³، محمدرضا فراهانی⁴، رامین هاشمی^{5*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/10/10

پذیرش: 98/12/14

کلیدواژگان:

فرآیند اتصال نوردی

روش همبستگی تصاویر دیجیتال

پارامترهای الاستیک و پلاستیک

ضریب ناهمسانگردی

در این مقاله، برای اولین بار مدول یانگ، ضریب ناهمسانگردی و پارامترهای الاستیک و پلاستیک کامپوزیت‌های سه لایه آلومینیوم-برنج-آلومینیوم تولید شده با فرآیند اتصال نوردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال ارزیابی شده است. همبستگی تصاویر دیجیتال یک روش نسبتاً جدید است که برای اندازه‌گیری میدان کرنش و تعیین پارامترهای مختلف مانند ناهمسانگردی و مدول یانگ برای مواد و آلیاژهای زیادی آزموده شده است. ساختار، خواص مکانیکی، پارامترهای الاستیک و پلاستیک، کامپوزیت‌های سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با روش اتصال سرد نوردی با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسختی و آزمون کشش همراه با ستاپ دوبعدی روش همبستگی تصاویر دیجیتال تعیین شد. با استفاده از کرنش طولی و عرضی بدست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و روابط پلاستیسیته، کرنش در راستای ضخامت، ضریب ناهمسانگردی و سایر پارامترهای الاستیک و پلاستیک محاسبه شد. نتایج نشان داد که به دلیل کارسختی ناشی از افزایش چگالی ناهنجاری در حین نورد خواص مکانیکی نسبت به نمونه‌های اولیه بهبود یافت به طوری که استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی کامپوزیت، نسبت به آلومینیوم اولیه بیش از پنج برابر و میکروسختی هر دولایه آلومینیوم و برنج بیش از دو برابر افزایش یافت. مقدار مدول الاستیسیته محاسبه شده با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال 77.8GPa بدست آمد که نسبت به مقادیر بدست آمده از روابط تئوری بر اساس حجم مواد تشکیل‌دهنده دارای اختلاف اندک است. همچنین مقدار ضریب ناهمسانگردی در حین آزمون کشش، پس از نوسان اولیه تا نقطه گلوئی، افزایش و سپس روند کاهشی به خود گرفت و کمی قبل از شکست ثابت شد.

Evaluation of the elastic and plastic properties of Al/Brass/Al composite fabricated by roll bonding process via digital image correlation method

Davood Rahmatatabadi¹, Ali Shahmirzalo², Moslem Tayyebi³, Mohammad Reza Farahani², Ramin Hashemi^{1*}

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

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

3- Department of material engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

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

Keywords

CRB
DIC method
elastic and plastic parameters
anisotropy coefficient

Abstract

In the present study, for the first time the Young's modulus, anisotropy coefficient and elastic and plastic parameters of multi-layered Al/Br/Al composite produced by cold roll bonding process were assessed by digital image correlation method. The digital image correlation (DIC) is a relatively new method used to measure strain fields to determine various parameters such as anisotropy and Young's modulus for many materials and alloys. Structure, mechanical properties, elastic and plastic parameters are determined by optical microscopy (OM), micro-hardness measurements and tensile tests equipped by 2D DIC system. Using longitudinal and transverse strains from DIC and plasticity theory thickness strain, anisotropy coefficient and other elastic and plastic parameters were calculated. The results showed that mechanical properties were improved compared to the primary samples, so that the yield strength and ultimate tensile strength of the composite were more than five times the original aluminum, and microhardness of both layers of aluminum and brass improved more than two times due to cold working caused by increasing the dislocation density during rolling. The value of the calculated elastic modulus was obtained 77.8GPa by digital image correlation method, which are little difference from the values obtained from theoretical relationships based on the volume of the composite materials. Also, the anisotropy coefficient during the tensile test, after the initial oscillation increased to the necking point, then decreased and a little before the failure point fixed

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:
Rahmatatabadi, D. Shahmirzalo, A. Tayyebi, M. Farahani, M. R. and Hashemi, R., "Evaluation of the elastic and plastic properties of Al/Brass/Al composite fabricated by roll bonding process via digital image correlation method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 581-590, 2020.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد سبک و کامپوزیت‌های پایه فلزی به شدت افزایش یافته است، تا علاوه بر کاهش وزن سازه، بهره‌وری سیستم مورد نظر در صنایع مختلف را افزایش دهند. البته استفاده از فلزات سبک و کامپوزیت‌های زمینه فلزی مانند آلایژها و کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و غیره، علاوه بر داشتن چگالی پایین، متناسب با سازه و یا صنعت مورد استفاده باید خواص تکمیل‌کننده دیگر مانند استحکام کافی، مقاومت خوردگی و سایش، شکل‌پذیری مطلوب و غیره را داشته باشند.

به عبارت دیگر، در طراحی قطعات مهندسی عمدتاً استفاده از یک نوع فلز یا آلایژ رواج دارد، اما هنگامی که شاخص‌های مکانیکی، سازه‌ای، خوردگی و الکتریکی خاصی مطرح می‌شود، این روش چندان کارآمد نخواهد بود و مواد جدید مانند کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلایژهای آلومینیوم به دلیل خواص گوناگون به طور گسترده برای مصارف متفاوت استفاده می‌شود و پرکاربردترین فلز در کامپوزیت‌ها می‌باشد. آلومینیوم و آلایژهای آن به سبب چگالی پایین، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و نیز مقاومت به خوردگی قابل قبول شناخته شده‌اند [1, 2]. از طرف دیگر، آلایژهای مس به علت خواص الکتریکی و حرارتی عالی که دارند در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته مس و آلایژهای آن دارای خواص مکانیکی و شکل‌پذیری مطلوب می‌باشند ولی به دلیل چگالی بالا، عموماً در صنایع و قطعات الکتریکی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [3, 4]. از میان آلایژهای پایه مس، برنج‌ها به دلیل مقاومت به خوردگی عالی، استحکام و شکل‌پذیری خوب و قابلیت ماشین‌کاری فوق‌العاده از دیگر مواد مهندسی متمایز شده برای کاربردهای خاص و مهم نظیر اجزای الکتریکی، لوله و اتصالات استفاده می‌شوند. آلومینیوم و برنج هر دو دارای مقاومت به خوردگی بالا و هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب هستند و از اتصال این دو فلز می‌توان در سیستم‌های انتقال حرارت مکانیکی و کاربردهای الکتریکی استفاده کرد. تاکنون برای اتصال آلومینیوم به برنج از روش‌های مختلفی نظیر ریخته‌گری گریز از مرکز، اتصال نفوذی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری فراصوتی استفاده شده است. در مقایسه با سایر فرآیندهای اتصال‌دهی فلزات، اتصال نوردی یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی لایه‌ای است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. قابل ذکر است که این فرآیند از چند دهه قبل مورد استفاده قرار گرفته شده و با افزایش کاربرد کامپوزیت‌های فلزی و نیاز به روش‌های تولید ساده، بهینه و کارآمد، روش اتصال نوردی توجه بیشتری یافت. فرآیند اتصال نوردی در سال 1959 توسط واسطه‌های واسطه‌ای¹ مورد بررسی قرار گرفت. این فرآیند جوشکاری حالت جامد است که برای اتصال فلزات مشابه یا غیر مشابه استفاده کاربرد دارد [5]. در این فرآیند دو یا چند فلز یا آلایژ روی هم قرار داده می‌شود و مقدار تغییر شکل لازم برای برقراری اتصال مناسب با عبور دادن نمونه از غلطک‌های نورد اعمال می‌شود [2, 3, 6-8]. قابل ذکر است که قبل از اعمال نورد، باید سطوح در تماس کاملاً تمیز شوند و آماده‌سازی سطحی مهم‌ترین مرحله برای برقراری پیوند مناسب بین لایه‌ها می‌باشد. مطابق با نظر بای² و ژانگ³، دو روش رایج برای حذف آلاینده‌ها و اکسیدهای سطحی، تمیز کردن شیمیایی و مکانیکی است [9]. جوش نوردی از سالیان دور تاکنون مورد

توجه و استفاده محققین قرار گرفته است و پارامترهای مختلفی بررسی شده است. در اولین تحقیقات در این زمینه، وایدیاناث در سال 1959 به بررسی نرخ کرنش یا زمان جوشکاری نوردی پرداخت گرفت [10] و در سال‌های بعد نیز پن⁴ و همکاران به بررسی اثر دما بر استحکام پیوند پرداختند [11]. دانش‌منش و کریمی به بررسی اثر درصد تغییر شکل در حین نورد در دماهای مختلف پرداختند [12]. وایدیاناث و همکاران در سال 1959 و بعدها محمد⁵ و واشبرن⁶ در سال 1975 ادعا کردند که مکانیزم اتصال نوردی بر اساس تئوری فیلم است و به دلیل دمای پایین فرآیند تئوری فیلم نقش اصلی در ایجاد اتصال را ایفا می‌کند [10, 13]. با توجه به این 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. علاوه بر این تحقیقات در سالیان اخیر نیز محققین به بررسی پارامترهای مختلف در فرآیند اتصال نوردی و تولید کامپوزیت‌ها و آلایژهای مختلف پرداخته‌اند. در این بین، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی عالی آلومینیوم، در دسترس و ارزان بودن و همچنین قابلیت جوش نوردی بسیار بالا دارای بیشترین کاربرد است. در حالت کلی، فرآیند اتصال سرد نوردی قابل استفاده برای اکثر فلزات است و در مواردی که پیوند مناسب بین لایه‌ها برقرار نمی‌شود از تکنیک‌های مختلف مانند افزایش دما، افزایش کاهش ضخامت، آماده‌سازی سطحی پیشرفته‌تر برای بهبود پیوند استفاده می‌شود. نتیجه بسیاری از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که اتصال نوردی علاوه بر دارا بودن قابلیت ایجاد اتصال بین اکثر فلزات و تولید کامپوزیت‌ها، می‌تواند استحکام کششی، چقرمگی شکست، میکروسختی را تا چند برابر نمونه‌های اولیه بهبود دهد.

پارامترهای الاستیک و پلاستیک مانند مدول الاستیسیته، توان کارسختی و ناهمسانگردی از عوامل تعیین‌کننده رفتار مواد در هنگام بارگذاری هستند که تاکنون برای آلایژها و کامپوزیت‌های تولید شده به روش اتصال نوردی مورد توجه و بررسی قرار نگرفته‌اند. البته یکی از دلایل این امر، نبود روش مناسب و دقیق برای بررسی است و عمدتاً به دلیل سختی کار، همان خواص الاستیک و پلاستیک ماده اولیه برای نمونه‌های تولید شده به روش اتصال نوردی در نظر گرفته می‌شود، یا برای کامپوزیت‌های تولید شده از روابط تئوری مبتنی بر حجم مواد تشکیل‌دهنده کامپوزیت استفاده می‌شود که قاعدتاً نمی‌تواند مورد اطمینان باشد.

مدول الاستیسیته (E) یا همان مدول یانگ برابر است با نسبت تنش بر کرنش ایجاد شده به واسطه‌ی تنش وارده بر جسم در حالتی که جسم در ناحیه الاستیک قرار گرفته باشد و معیاری برای توصیف صلبیت مواد جامد است. مدول الاستیسیته توسط نیروهای اتصال بین اتم‌ها تعیین می‌شود. چون این نیروها نمی‌توانند بدون تغییر ماهیت اصلی ماده تغییر کنند، در نتیجه مدول الاستیسیته یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی حساس به ساختار است و عناصر آلایژی، عملیات حرارتی، یا کار سرد تاثیر کمی بر این مدول دارند. واحد مدول الاستیسیته در SI پاسکال (هم‌واحد با تنش) است.

تاکنون تحقیقی در زمینه شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک برای استفاده در نرم‌افزارهای عددی جهت پیش‌بینی رفتار ماده تولید شده به روش اتصال نوردی در شرایط مختلف انجام نشده است. درک درست از خواص مکانیکی مواد به خصوص مواد جدید نظیر مواد تولید شده به روش اتصال

⁴ Pan

⁵ Mohamed

⁶ Washburn

¹ Vaidyanath

² Bay

³ Zhang

نوردی در طراحی و مدل سازی اجزایی که از این مواد استفاده می شود بسیار مهم و حیاتی است.

محاسبه پارامترهای الاستیک معمولاً از طریق اندازه گیری کرنش در جهات مختلف انجام می شود و روش های مختلفی برای اندازه گیری کرنش وجود دارد. روش کرنش سنج یکی از روش های ساده و قابل استفاده است ولی میزان خطا در کرنش اندازه گیری شده در ناحیه گلوبی تا شکست بسیار زیاد بوده و گزارش شده است که فقط تا نقطه گلوبی دارای دقت مناسب است [14]. روش دیگر که در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، روش همبستگی تصاویر دیجیتال است که در آن محدودیت اندازه گیری کرنش با دقت بالا وجود ندارد و می تواند میدان کامل جابه جایی و کرنش در کل ناحیه تغییر شکل پلاستیک را اندازه گیری کند.

شاهمیرزالی و همکاران از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای تعیین خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم آلیاژی 6065، استفاده کردند [15]. آنها با استفاده از دو روش تغییر شکل یکنواخت و میدان مجازی، پارامترهای الاستیک و پلاستیک را استخراج کردند و نشان دادند که این دو روش تطابق خوبی با هم دارند [15]. همچنین در این کار به بررسی اندازه زیر مجموعه روی ضریب همبستگی پرداخته شد و مقدار بهینه برای پردازش تصویر را تعیین نمودند. همچنین با توجه با قابلیت منحصر به فرد این روش مطالعات گسترده ای در زمینه تعیین خواص مواد به صورت موضعی و در نواحی مختلف جوش شده انجام شده است؛ در سال 2018، فوهرینگ¹ و همکاران، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، خواص مکانیکی تیتانیوم تولید شده با فرآیند روش های تولید افزودنی² حین آزمون کشش تک محوره را محاسبه کردند [16]. در سال 2018، اریل³ و همکاران، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، ثابت الاستیک و ضریب ناهمسانگردی در جهت های مختلف را برای کامپوزیت ها محاسبه کردند [17]. سانچز⁴ [18] نیز از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای شناسایی خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژهای حافظه دار استفاده کرد و این روش را یک روش مناسب، با دقت کافی و ارزان قیمت برای شناسایی خواص ماده معرفی کرد. همان طور که اشاره شد، استفاده از این روش برای ارزیابی پارامترهای الاستیک و پلاستیک مواد مختلف در حال گسترش است.

در این تحقیق، برای اولین بار پارامترهای الاستیک و پلاستیک شامل مدول الاستیسیته، توان کرنش سختی، ثابت استحکام و ضریب ناهمسانگردی کامپوزیت لایه ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با اتصال نوردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، در ابتدا ورق سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با فرآیند اتصال نوردی در دمای محیط و کاهش ضخامت 66% تولید شد و سپس با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در حین آزمون کشش تک محوره در جهت نورد مقادیر کرنش در دو جهت طولی و عرضی محاسبه شد و با استفاده از روابط تئوری پارامترهای مختلف محاسبه شد.

2- روش همبستگی تصاویر دیجیتال

DIC یک روش اندازه گیری است که بر اساس اصول فوتوگرامتری، برای اندازه گیری میدان کامل جابجایی روی سطح جسم توسعه پیدا کرده است. مشابه فوتوگرامتری، تصاویر دیجیتال از نمونه تحت آزمایش در طی بارگذاری

¹ Foehring

² Additively Manufactured (AM)

³ Orell

⁴ Sánchez

⁵ subset

گوشه‌ها با استفاده از مته به قطر 1.5 میلی‌متر سوراخ شده و با سیم فولادی نرم محکم بهم بسته می‌شوند. در مرحله پایانی عملیات نورد با سرعت ۱۴ دور بر دقیقه در دمای محیط و بدون پیشگرم با اعمال کاهش ضخامت 66% انجام شد و پیوند مناسب بین لایه‌ها برقرار شد و کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با موفقیت تولید شد [6-8]. درصد حجمی کامپوزیت تولید شده حدود ۳۳٪ برنج و ۶۷٪ آلومینیوم خالص تجاری می‌باشد. محققین پیشنهاد کرده‌اند که با کاهش زمان بین عملیات آماده‌سازی سطحی و نورد و جلوگیری از اکسید سطحی لایه‌های برس خورده، می‌توان به پیوند قوی‌تر دست یافت [1, 24, 25]. همچنین لایه‌برداری به وسیله برس خورشیدی و اعمال کاهش ضخامت بالا در حین نورد، مهم‌ترین عوامل جهت برقراری پیوند مناسب بین لایه‌ها در فرآیند جوش سرد نوردی می‌باشند. البته پارامترهای دیگر مانند، سرعت نورد، ضخامت اولیه، دمای فرآیند و غیره نیز بر استحکام پیوند موثر هستند.

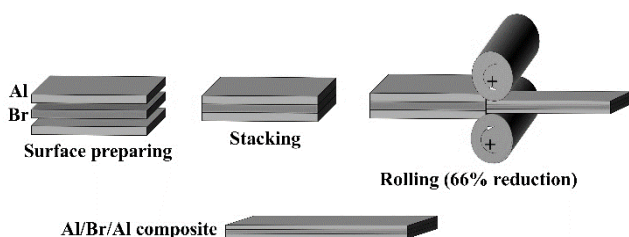


Fig 2 A schematic illustration of CRB process

شکل 2 شماتیک فرآیند اتصال سرد نوردی

3-2- آزمایش کشش تک‌محوره و میکروسختی

به منظور بررسی خواص الاستیک و پلاستیک، ورق دولایه آلومینیومی تولید شده به روش اتصال نوردی، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M-9 در ابعاد 12 در 6 میلی‌متر آماده شد. نمونه‌ها مطابق با ابعاد نشان داده شده در شکل 3 بریده شده و برای آزمون DIC استفاده شد. قبل از تست کشش، نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده شده، و بعد از خشک شدن، خال‌های سیاه به صورت رندم روی نمونه‌ها ایجاد شده‌اند. بعد از آماده‌سازی سطح، نمونه‌ها در دمای اتاق توسط دستگاه کشش اینسترون با ظرفیت 150 کیلو نیوتن و با سرعت پیشروی 0.5 میلی‌متر بر ثانیه تحت کشش واقع شده‌اند. سیستم DIC دوبعدی در این تحقیق استفاده شده است. ستاپ مورد استفاده در این آزمایش در شکل 4 نشان داده شده است. به منظور بررسی میکروسختی لایه‌های آلومینیوم و برنج، نمونه‌هایی از آلومینیوم و برنج اولیه و کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم، در جهت عمود بر نورد (صفحه ضخامت-طول) آماده شد و به منظور سهولت در جابه‌جایی و انجام آزمون میکروسختی ویکرز از مانت سرد استفاده شد. قبل از انجام آزمون، آماده‌سازی با سنباده‌زنی با شماره‌های 800-1200 جهت ایجاد سطحی صاف و هموار انجام شد. آزمون میکروسختی، با اعمال نیروی 1.96N، در دمای اتاق و زمان اعمال بار 10 ثانیه برای بیش از 10 نقطه مختلف به صورت تصادفی برای هر لایه انجام شد. نهایتاً، مقادیر میکروسختی با حذف بزرگترین و کوچکترین داده و میانگین-گیری از مابقی داده‌ها برای آلومینیوم و برنج اولیه و لایه‌های آلومینیوم و برنج در کامپوزیت تولید شده به روش اتصال سرد نوردی گزارش شد. همچنین مقدار میکروسختی برای لایه‌های آلومینیوم و برنج در راستای ضخامت بررسی و مورد مقایسه قرار گرفت.

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

$$x' = x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (2)$$

$$y' = y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (3)$$

در معادلات بالا، \bar{f} متوسط مقدار شدت زیر مجموعه مرجع؛ \bar{g} متوسط مقدار شدت از زیرمجموعه‌های تغییر شکل؛ m پهنای زیر مجموعه در پیکسل، u_0 و v_0 تغییر شکل از مرکز زیر مجموعه در جهات x و y است.

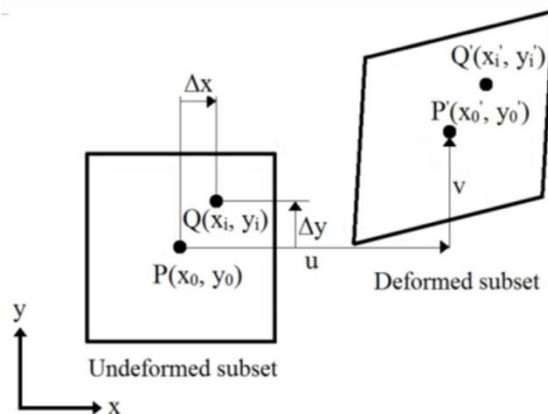


Fig 1 Schematic of subset in DIC before and deformed [15]

شکل 1 شماتیک زیرمجموعه در روش همبستگی تصاویر دیجیتال قبل و بعد از تغییر شکل [15]

3- روش تحقیق

1-3- اتصال نوردی

در این مقاله، از آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژ برنج (متشکل از 63% مس و 37 درصد روی) با ضخامت یکسان یک میلی‌متر به عنوان ورق‌های اولیه استفاده شد. به منظور افزایش کارپذیری و یکتاخستی در ساختار، ورق‌های آلومینیوم خالص تجاری 1050 به مدت یک ساعت در دمای 380 درجه سانتی‌گراد و ورق‌های برنج به مدت یک ساعت در دمای 800 درجه سانتی-گراد تحت عملیات انیل قرار گرفتند و در کوره خنک شدند. فرآیند جوش سرد نوردی دارای سه مرحله، آماده‌سازی اولیه شامل چربی‌زدایی شیمیایی و مکانیکی، روی هم قرار دادن و بستن ورق‌ها، و انجام عملیات نورد با کاهش ضخامت مطلوب جهت ایجاد پیوند مناسب است که همگی این مراحل در شکل 2 به صورت شماتیک ارائه شده است. برای انجام فرآیند جوش سرد نوردی، یک ورق آلیاژ برنج و دو ورق آلومینیوم خالص تجاری در ابعاد یکسان 8 در 16 سانتی‌متر آماده شد. همان‌طور که اشاره شد، عملیات آماده‌سازی سطحی شامل شست‌وشو با آب و صابون، چربی‌زدایی در حمام استون و لایه-برداری با استفاده از برس خورشیدی از جنس فولاد می‌باشد و این عملیات برای هردو طرف آلیاژ برنج و لایه‌های در تماس آلومینیومی انجام شد. پس از اتمام عملیات آماده‌سازی، سه ورق روی هم قرار گرفتند به طوری که ورق‌های آلومینیوم لایه‌های خارجی و آلیاژ برنج لایه‌ی درونی کامپوزیت را تشکیل می‌داد. به منظور جلوگیری از سر خوردن لایه‌ها در حین نورد، هر سه ورق از

در شرایط تنش صفحه‌ای که حالت تنش دوبعدی است، با فرض اینکه هیچ نوع تغییر تنشی در امتداد ضخامت نداریم معادله (5) می‌تواند به معادله (6) تغییر کند. پارامتر b ضخامت نمونه است [23].

$$b \int_{S_v} \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dS_v = b \int_w \bar{T}_i \cdot u_i^* dw \quad (6)$$

همچنین نیروی عکس‌العمل F مربوط به زمان t_i می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$b \int_w \bar{T}_i dw = F(t_i) \quad (7)$$

با جایگذاری معادله (7) در معادله (6) معادله (8) بدست می‌آید:

$$\int_{S_v} \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot u_i^* \quad (8)$$

معادله بالا ساده شده معادله VFM است که برای شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک استفاده می‌شود.

5- ارائه نتایج و بحث

1-1- تصاویر میکروسکوپ نوری

در شکل 5، میکروساختار کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم را بعد از فرآیند اتصال سرد نوردی نشان می‌دهد. مطابق با شکل 5، لایه‌های آلومینیوم در سطوح خارجی قرار گرفته و از فلز برنج به عنوان تقویت‌کننده در مرکز دو ورق آلومینیوم خالص استفاده شده است. با اعمال کاهش ضخامت 66%، یک اتصال مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و برنج ایجاد شده است. مطابق با شکل 5، لایه‌ها به صورت پیوسته بوده و ناحیه گردنی شکل موضعی (تحت تنش زیاد) دیده نمی‌شود؛ زیرا مقادیر کرنش اعمالی برای ایجاد ناحیه گردنی شکل موضعی کافی نمی‌باشد. همچنین به علت ضخامت کم لایه‌ها و تاثیر لایه‌ها بر یکدیگر در حین اعمال بار، ترکیب این سه لایه پس از اتصال، یک کامپوزیت لایه‌ای است.



Fig 5 microstructure of primary sandwich of multi-layered Al/Brass composite

شکل 5 ریزساختار کامپوزیت چند لایه آلومینیوم و برنج در نورد اولیه

2-2- پارامترهای الاستیک و پلاستیک

مقدار کرنش در راستای عرض و طول نمونه در حین آزمون کشش از قسمت قبلی و با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شد. برای بدست آوردن کرنش در راستای ضخامت از رابطه ثابت بودن حجم (معادله

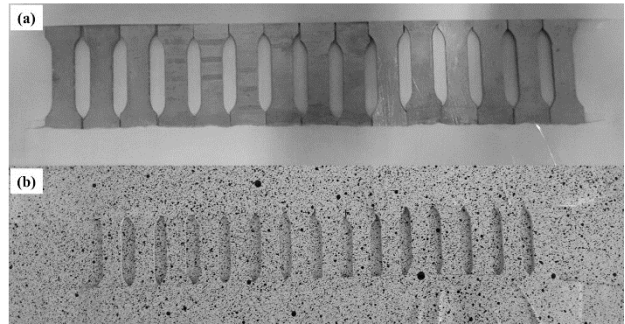


Fig 3 The tensile test samples: (a) before and (b) after surface preparation

شکل 3 نمونه‌های آزمون کشش: (a) قبل و (b) بعد از آماده‌سازی سطحی

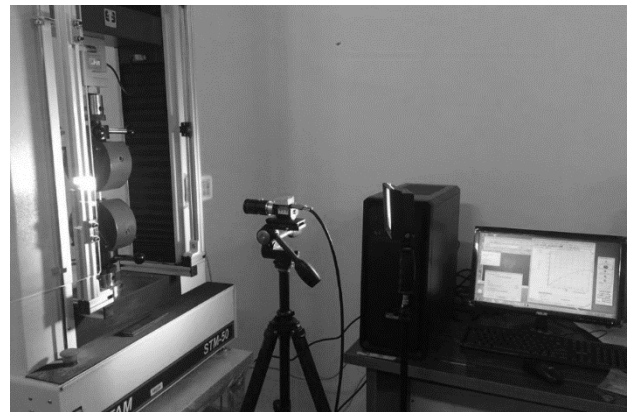


Fig 4 A set up of tensile test with DIC equipment's

شکل 4 راه‌اندازی آزمون کشش همراه با تجهیزات همبستگی تصاویر دیجیتال

4- اندازه‌گیری خواص الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها

1-1- روش میدان مجازی

روش میدان مجازی¹، براساس اصل کار مجازی است که شکل ضعیف شده از معادلات تعادلی موضعی و میدان‌های جابه‌جایی مجازی و قابل قبول جنبشی است و برای استخراج پارامترها بکار برده می‌شود. در اینجا اساس معادلات و روش استفاده شده برای حل پارامترهای الاستیک و پلاستیک با استفاده از VFM به صورت جزئی مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادله اساسی حاکم از VFM در معادله (4) ارائه شده است. این معادله شکل ضعیف شده از مشتق معادله تعادلی با استفاده از اصل کار مجازی است [15, 23].

$$\int_v \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dv + \int_{S_f} \bar{T}_i \cdot u_i^* ds + \int_v b_i \cdot u_i^* dv = \int_v \rho a_i \cdot u_i^* dv \quad (4)$$

چون، حجم و نیروهای اینرسی سهم ناچیزی نسبت به کل کار انجام شده دارند، بنابراین معادله (4) می‌تواند به صورت معادله (5) ساده شود [15, 23].

$$\int_v \sigma_{ij} : \varepsilon_{ij}^* dv = \int_{S_f} \bar{T}_i \cdot u_i^* ds \quad (5)$$

¹ Virtual Field Method (VFM)

کامپوزیت‌های لایه‌ای، نمی‌توان به روابط تئوری اطمینان کرد و نیازمند بررسی تجربی و یا ارائه روابط تئوری جدید و دقیق‌تر با در نظر گرفتن ساختار لایه‌ای این مواد است. همچنین ضریب پواسون کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم نیز برابر 0.349 بدست آمد.

جدول 1 پارامترهای الاستیک محاسبه شده با همبستگی تصاویر دیجیتال برای کامپوزیت آلومینیوم برنج چند لایه

Table 1 The elastic parameters calculated by DIC for multilayered Al/Brass composite

ماده	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
آلومینیوم خالص تجاری	37	69.3	0.310
آلومینیوم/برنج/آلومینیوم	186	77.4	0.349

با استفاده از نتایج آزمون کشش (شکل 6)، پارامترهای پلاستیک شامل استحکام کششی نهایی، ضریب استحکام، توان کارسختی و ضریب ناهمسانگردی محاسبه شد و در جدول 3 ارائه شد. مطابق با نتایج جدول 3، کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم در مقایسه با ورق‌های اولیه آلومینیوم و برنج استحکام بالاتری از خود نشان داد. استحکام کامپوزیت تولید شده به حدود 274MPa رسید که نسبت به آلومینیوم اولیه بیش از پنج برابر افزایش یافته است. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، مقدار استحکام کششی نهایی نیز مانند استحکام تسلیم، به دلیل نقش تقویت‌کننده آلیاژ برنج و کارسرد در حین نورد، نسبت به آلومینیوم خالص تجاری 1050 به شدت افزایش یافته است.

جدول 2 روابط تئوری ارائه شده برای تخمین مقدار مدول الاستیسیته آلومینیوم/برنج بر اساس حجم مواد تشکیل دهنده

Table 2 presented theoretical relationships to estimate value of the elastic modulus of aluminum/brass based on the volume of constituent materials.

مدول یانگ مدل تئوری (GPa)	مدول
$E_{Al/Brass} = V_{Al}E_{Al} + V_{Brass}E_{Brass}$	82.7
$\frac{1}{E_{Al/Brass}} = \frac{V_{Al}}{E_{Al}} + \frac{V_{Brass}}{E_{Brass}}$	78.8
$\log E_{Al/Brass} = V_{Al} \times \log E_{Al} + V_{Brass} \times \log E_{Brass}$	80.6

همچنین نتایج آزمون میکروسختی ویکرز نشان داد که مقدار میکروسختی برای هر دو لایه آلومینیوم و برنج پس از نورد به شدت افزایش می‌یابد و میکروسختی لایه آلومینیوم از 24 به حدود 49 ویکرز و برای آلیاژ برنج از 95 به حدود 221 ویکرز می‌رسد که نشان می‌دهد مقدار سختی ویکرز برای هر دو لایه آلومینیوم خالص تجاری و برنج بیش از دو برابر شده است. البته مقدار افزایش میکروسختی برای لایه برنج بیشتر از آلومینیوم خالص تجاری است که به دلیل توان کارسختی بیشتر و انرژی نقص در چینش کمتر در آلیاژ برنج، نرخ کارسختی در کرنش برابر در حین نورد برای لایه برنج بیشتر از آلومینیوم است. نسبت این تغییرات خواص مکانیکی به دلیل افزایش چگالی ناهنجاری ناشی از اعمال کارسرد مکانیکی (کاهش ضخامت بالا در دمای محیط) می‌باشد [28-30]. در مقابل افزایش قابل توجه استحکام کششی و میکروسختی، مقدار ازدیاد طول کامپوزیت تولید شده نسبت به آلیاژهای آنیل

(9) در تغییر شکل پلاستیک استفاده می‌شود. در شکل 6، نمودار تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده به روش اتصال نوردی برای کرنش در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تنش در ناحیه الاستیک و پلاستیک، میزان کرنش افزایش می‌یابد و پس از یک رابطه خطی بین تنش کرنش در ناحیه الاستیک، کرنش وارد منطقه پلاستیک می‌شود. این روند برای هر سه کرنش عرضی، طولی و ضخامتی تقریباً مشابه است. همچنین مطابق با شکل 6، شیب ناحیه الاستیک در هر کرنش در راستاهای مختلف متفاوت بوده و بیشترین شیب خطی برای کرنش عرضی مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش بار اعمالی و ورود به ناحیه پلاستیک، اختلاف کرنش در جهات مختلف افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن، وجود ناهمسانگردی تقریباً زیاد در نمونه به دلیل عملیات نورد و کشیده شدن دانه‌ها در جهت نورد است. همچنین مطابق با شکل 6، مشاهده می‌شود که مقدار کرنش در سه راستا در حداکثر استحکام کششی متفاوت است. بیشترین و کمترین کرنش در راستای طولی و ضخامتی است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، بزرگ بودن کرنش در راستای طولی نسبت به عرضی و ضخامتی به دلیل بزرگ بودن طول نمونه کشش، نسبت به عرض و ضخامت و همچنین همراستا بودن جهت اعمال نیرو با راستای طولی است. در ادامه در رابطه با ضریب ناهمسانگردی توضیحات بیشتری ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} \varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t &= 0 \\ \varepsilon_t &= -(\varepsilon_l + \varepsilon_w) \end{aligned} \quad (9)$$

در جدول 1، نتایج بررسی پارامترهای الاستیک ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش تسلیم کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج نسبت به آلومینیوم خالص تجاری افزایش یافته است. مقدار تنش تسلیم بدست آمده برابر با 186MPa است که نسبت به آلومینیوم خالص تجاری 1050 بیش از پنج برابر افزایش یافته است. استفاده از آلیاژ برنج با استحکام بالا به عنوان تقویت‌کننده، افزایش چگالی ناهنجاری به دلیل کارسختی در حین نورد با اعمال کرنش بالا، از دلایل اصلی افزایش چند برابری استحکام تسلیم در کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم نسبت به آلومینیوم اولیه است [26, 27].

همچنین در جدول 1، مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون گزارش شده است. مدول یانگ برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با روش پیوستگی تصاویر دیجیتال 77.4 GPa بدست آمد که به ترتیب نسبت به آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژ برنج، بیشتر و کمتر می‌باشد. با توجه به درصد حجمی مواد تشکیل دهنده (قانون اختلاط) و روابط تئوری موجود، مقدار مدول یانگ کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم باید در محدوده مدول یانگ آلومینیوم خالص تجاری و برنج باشد. روابط تئوری براساس قوانین اختلاط و حجم مواد تشکیل دهنده، در جدول 2 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار مدول یانگ بدست آمده از روابط تئوری در محدوده 78.8GPa تا 82.7GPa است که نسبت به نتیجه بررسی پیوستگی تصاویر دیجیتال بیشتر می‌باشد، هرچند اختلاف بین آن‌ها ناچیز است. مقایسه روابط تئوری و نتیجه آزمون همبستگی تصاویر دیجیتال نشان می‌دهد که این روابط، فقط محدوده مدول الاستیسیته را مشخص می‌کند که برای مواد و ساختارهای مختلف روابط متفاوتی پیشنهاد شده است که می‌تواند به مقادیر واقعی نزدیک‌تر باشد و به منظور درک درست و دقیق از مدول الاستیسیته

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_l^2 + \epsilon_w^2 + \epsilon_t^2)} \quad (11)$$

شده اولیه به شدت کاهش می‌یابد که با توجه به افزایش استحکام و میکروسختی و کار سرد مکانیکی منطقی به نظر می‌رسد [26, 31, 32].

جدول 3 پارامترهای پلاستیک محاسبه شده با همبستگی تصاویر دیجیتال
Table 3 The plastic parameters calculated by DIC

ماده	ضریب استحکام (MPa)	توان کارسختی	ضریب انحراف (MPa)	ناهمسانگردی
آلومینیوم	120.7	0.214	61.3	1.51
آلومینیوم-برنج	1093	0.034	274	0.273

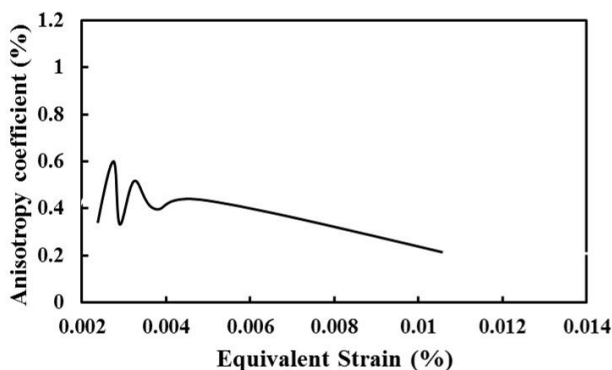


Fig. 7 Variation of anisotropy at equivalent strain during uniaxial tensile test for multilayered Al/Brass composite produced by ARB

شکل 7 تغییرات ناهمسانگردی بر حسب کرنش موثر در حین آزمون کشش تک‌محوره برای آلومینیوم و برنج دولایه تولید شده به روش اتصال نوردی

6- نتایج

در این تحقیق برای اولین بار، پارامترهای الاستیک و پلاستیک یک کامپوزیت لایه‌ای تولید شده به روش جوش سرد نوردی مورد مطالعه تجربی قرار گرفت و با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال به عنوان یک روش نوین، دقیق و غیرتماسی، مدول یانگ، ضریب پواسون، ضریب استحکام، توان کارسختی، ضریب ناهمسانگردی، استحکام تسلیم و کششی نهایی کامپوزیت سه لایه آلومینیوم/برنج/آلومینیوم استخراج شد. روش همبستگی تصاویر دیجیتال یک روش نوین، با دقت بالا برای اندازه‌گیری میدان‌های جابه‌جایی می‌باشد که با ردیابی نقاط مشابه از تصاویر دیجیتال قبل و بعد از تغییر شکل میزان جابه‌جایی را محاسبه می‌کند و دارای سه مرحله پوشش الگو روی سطح نمونه، ثبت تصاویر دیجیتال از سطح تغییر شکل یافته و سطح اولیه و نهایتاً استفاده از نرم‌افزار برای اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و کرنش است. همچنین آزمون میکروسختی ویکرز و میکروسکوپ نوری برای بررسی پیوند بین لایه‌ها و تغییرات میکروسختی هر دو لایه آلومینیوم و برنج مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار کامپوزیت نشان داد که یک ساختار کاملاً لایه‌ای با پیوند مناسب بین آلومینیوم و برنج برقرار شده است. این پیوند با استفاده از جوش سرد نوردی با کاهش ضخامت 66% بدست آمد. سختی لایه‌های آلومینیوم و برنج به ترتیب از 24 و 95 برای حالت قبل از نورد (ورق‌های اولیه)، به حدود 48 و 222 ویکرز برای لایه‌های کامپوزیت تولید شده رسید که بیانگر افزایش بیش از دوبرابری برای هر دولایه می‌باشد.

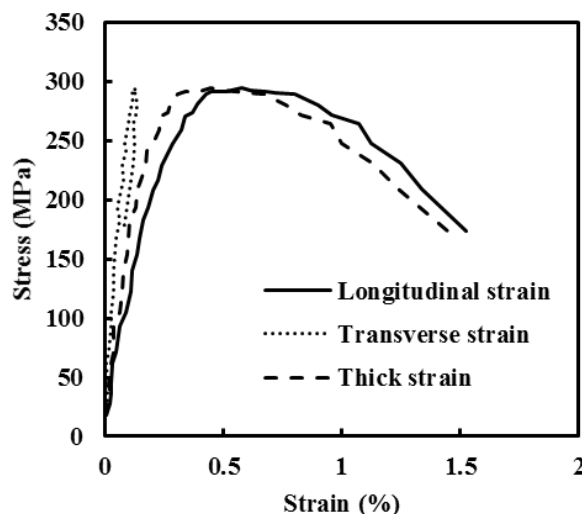


Fig 6 The engineering stress-strain curves of different longitudinal, transverse and thickness strains for Al/Brass composite produced by CRB

شکل 6 نمودارهای تنش کرنش مهندسی در کرنش‌های مختلف طولی، عرضی و ضخامتی برای آلومینیوم/برنج دولایه تولید شده به روش اتصال سرد نوردی

یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرآیندهای شکل‌دهی، ضریب ناهمسانگردی می‌باشد که در این مقاله با استفاده از روابط پلاستیسیته و روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شد. ضریب ناهمسانگردی در کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده به روش جوش سرد نوردی، مطابق با معادله (10) به صورت نسبت کرنش پلاستیک در راستای عرض به کرنش پلاستیک در ضخامت محاسبه شد. مقدار کرنش طولی و عرضی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال استخراج شد و با استفاده از معادله (9) مقدار کرنش در راستای ضخامت بدست آمد. در شکل 7، مقدار ناهمسانگردی پلاستیک بر حسب کرنش موثر برای کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده به روش جوش سرد نوردی ارائه شده است. برای محاسبه کرنش موثر از معادله (11) استفاده شده است. مطابق با شکل 7، مشاهده می‌شود که مقدار ناهمسانگردی برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج، با افزایش کرنش افزایش می‌یابد و کمی پس از نقطه‌ی گلویی کاهش می‌یابد. مطابق با جدول 3، مقدار ناهمسانگردی بر حسب کرنش مهندسی ارائه شده و ضریب ناهمسانگردی در نقطه‌ی گلویی 0.273 بدست آمد. در جدول 3، مقدار توان کرنش سختی و ضریب استحکام نیز ارائه شده است که از مقایسه توان کرنش سختی آلومینیوم خالص تجاری و کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم تولید شده با اتصال سرد نوردی می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال کار سرد و تغییر شکل شدید در کامپوزیت مقدار توان کارسختی کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر قابلیت کارمکانیکی در آن کاهش می‌یابد [33].

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\epsilon_w}{-(\epsilon_l + \epsilon_w)} \quad (10)$$

8- مراجع

[1] 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.

[2] 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.

[3] Rahmatabadi, D., Mohammadi, B., Hashemi, R. and Shojaee, T., "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.

[4] 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, Vol. 140, No. 10, pp. 101001-101001-11, 2018.

[5] Milner, D. and VAIDYANATH, L., "Significance of Surface Preparation in Cold Pressure Welding" MET CONSTR BR WELD J, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.

[6] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M. and Hashemi, R., "Investigation of Mechanical Properties, Fractography and Microstructure of Layered Al/Cu Composite Produced by Cold Roll Bonding", 2017.

[7] Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "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] Rahmatabadi, D., Hashemi, R., Mohammadi, B. and Shojaee, T., "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] Zhang, W. and Bay, N., "Influence of Different Surface Preparation Methods on the Bond Formation in Cold Pressure Welding" in Proceeding of 379-388.

[10] Vaidyarath, L., Nicholas, M. and Milner, D., "Pressure Welding by Rolling Brit" Welding J, Vol. 6, pp. 13-28, 1959.

[11] Pan, D., Gao, K. and Yu, J., "Cold Roll Bonding of Bimetallic Sheets and Strips" Materials science and technology, Vol. 5, No. 9, pp. 934-939, 1989.

[12] Danesh Manesh, H. and Karimi Taheri, A., "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.

[13] Mohamed, H. and Washburn, J., "Mechanism of Solid State Pressure Welding" Welding J, Vol. 55, pp. 302s-310s, 1975.

[14] Nguyen, V.-T., Kwon, S.-J., Kwon, O.-H. and Kim, Y.-S., "Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2d-Digital Image Correlation Method" Procedia Engineering, Vol. 184, pp. 381-389, 2017/01/01/, 2017.

[15] Shahmirzaloo, A. and Farahani, M., "Determination of Local Constitutive Properties of Aluminum Using Digital Image Correlation: A Comparative Study between Uniform Stress and Virtual Fields".

[16] Foehring, D., Chew, H. B. and Lambros, J., "Characterizing the Tensile Behavior of Additively Manufactured Ti-6al-4v Using Multiscale Digital Image Correlation" Materials Science and Engineering: A, Vol. 724, pp. 536-546, 2018/05/02/, 2018.

[17] Orell, O., Vuorinen, J., Jokinen, J., Kettunen, H., Hytönen, P., Turunen, J. and Kanerva, M., "Characterization of Elastic Constants of Anisotropic Composites in Compression Using Digital Image Correlation" Composite Structures, Vol. 185, pp. 176-185, 2018/02/01/, 2018.

[18] Sánchez-Arévalo, F. M. and Pulos, G., "Use of Digital Image Correlation to Determine the Mechanical Behavior of Materials" Materials Characterization, Vol. 59, No. 11, pp. 1572-1579, 2008/11/01/, 2008.

[19] Claire, D., Hild, F. and Roux, S., "A Finite Element Formulation to Identify Damage Fields: The Equilibrium Gap Method" International journal for numerical methods in engineering, Vol. 61, No. 2, pp. 189-208, 2004.

[20] Hedayati, N., Madoliat, R. and Hashemi, R., "Strain Measurement and Determining Coefficient of Plastic Anisotropy Using Digital Image Correlation (Dic)" Mechanics & Industry, Vol. 18, No. 3, pp. 311, 2017.

[21] Peters, W. and Ranson, W., "Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis" Optical engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 213427, 1982.

[22] Tong, W., "Formulation of Lucas-Kanade Digital Image Correlation Algorithms for Non-Contact Deformation Measurements: A Review" Strain, Vol. 49, No. 4, pp. 313-334, 2013.

همچنین نرخ افزایش بیشتر در لایه‌ی برنج به دلیل توان کارسختی بیشتر و انرژی نقص در چش کمر آلیاژ برنج نسبت به آلومینیوم خالص تجاری است. مقدار مدول الاستیسیته کامپوزیت آلومینیوم/برنج/آلومینیوم بین مقادیر مدول الاستیسیته آلومینیوم و برنج بدست آمد و نسبت به مقادیر بدست آمده از روابط تئوری بر اساس قانون اختلاط و حجم مواد تشکیل دهنده دارای اختلاف بود که این اختلاف به دلیل عدم در نظر گرفتن ساختار و پیوند بین لایه‌ها می‌باشد و بررسی دقیق مدول الاستیسیته نیازمند استفاده از آزمایشات تجربی یا استفاده معادلات تئوری جدید است. مقدار مدول الاستیسیته برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/برنج/آلومینیوم با روش همبستگی تصاویر دیجیتال حدود 77.8GPa محاسبه شد.

کامپوزیت تولید شده دارای استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی به مراتب بالاتر از مواد اولیه به خصوص آلومینیوم است که به دلیل افزایش چگالی ناهنجاری ناشی از کار سرد، پیوند مناسب بین لایه‌های، نقش تقویت کننده و کارسختی بالای آلیاژ برنج تشخیص داده شد. مقدار استحکام کششی نهایی حدود 274MPa بدست آمد که نسبت به آلومینیوم خالص بیش از پنج برابر بهبود یافته است.

برای بررسی ضریب ناهمسانگردی در حین آزمون کشش، کرنش در راستای طول، عرض، ضخامت و ضریب ناهمسانگردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و روابط پلاستیسیته بدست آمد و نتایج آن نشات داد که مقدار ناهمسانگردی در حین آزمون کشش تا نقطه گلوئی افزایش می‌یابد و کمی پس از آن، با افزایش کرنش تا نقطه‌ی شکست روند کاهشی دارد.

7- فهرست علائم

b	ضخامت نمونه (mm)
E	مدول یانگ (GPa)
F	نیرو (N)
r	ضریب ناهمسانگردی
S_f	ناحیه اعمال شرایط مرزی (mm^2)
S_v	ناحیه اندازه‌گیری کرنش سطحی (mm^2)
u_0	جابجایی در جهت x (mm)
u_0^*	میدان جابجایی مجازی (mm)
v_0	جابجایی در جهت y (mm)
V	حجم ابتدایی است (mm^3)
w	عرض نمونه (mm)
علائم یونانی	
ϵ_{ij}	کرنش
ϵ_{ij}^*	تانسور کرنش مجازی
$\bar{\epsilon}$	کرنش موثر
ϵ_l	کرنش طولی
ϵ_t	کرنش ضخامتی
ϵ_w	کرنش عرضی
σ_{ij}	تانسور تنش (MPa)
σ_y	تنش تسلیم (MPa)
σ_{UTS}	تنش کششی نهایی (MPa)
ν	ضریب پواسون

- [23] Saranath, K. and Ramji, M., "Local Zone Wise Elastic and Plastic Properties of Electron Beam Welded Ti-6Al-4V Alloy Using Digital Image Correlation Technique: A Comparative Study between Uniform Stress and Virtual Fields Method" *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 68, pp. 222-234, 2015.
- [24] 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.
- [25] 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*, 2017.
- [26] Jamaati, R. and Toroghinejad, M., "Cold Roll Bonding Bond Strengths: Review" *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
- [27] Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K. and Alexandrov, I. V., "Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation" *Progress in materials science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
- [28] Pasebani, S. and Toroghinejad, M. R., "Nano-Grained 70/30 Brass Strip Produced by Accumulative Roll-Bonding (Arb) Process" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 3, pp. 491-497, 2010.
- [29] Rahmatabadi, D., Tayyebi, M., Hashemi, R. and Eghbali, B., "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.
- [30] Motevalli, P. D. and Eghbali, B., "Microstructure and Mechanical Properties of Tri-Metal Al/Ti/Mg Laminated Composite Processed by Accumulative Roll Bonding" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 628, pp. 135-142, 3/25/, 2015.
- [31] tayyebi, m., Rahmatabadi, D., rashidi, r. and Hashemi, R., "Evaluation of Mechanical Properties and Microstructure for Al/Ni 5% Produced by Cross Accumulative Roll Bonding Process" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 2, pp. 279-288, 2018.
- [32] tayyebi, M., Rahmatabadi, D. and Hashemi, R., "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*, pp. -, 2018.
- [33] Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M. and Hashemi, R., "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.

