

Characterization of the Plastic and Elastic Properties of Aluminum Sheet Produced by CRB Process via DIC Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rahmatabadi D.¹ MSc,
Shahmirzaloo A.¹ MSc,
Farahani M.¹ PhD,
Hashemi R.² PhD

How to cite this article

Rahmatabadi D, Shahmirzaloo A, Farahani M, Hashemi R. Characterization of the Plastic and Elastic Properties of Aluminum Sheet Produced by CRB Process via DIC Method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):505-513.

ABSTRACT

The cold roll bonding (CRB) is a solid state welding process for bonding similar and dissimilar metals. The use of materials produced by the CRB method for different applications and the prediction of their behavior in simulation software requires the complete and accurate identification of their mechanical properties. Digital image correlation (DIC) is a powerful non-contact method for measuring the field of material deformation. Recently, the DIC method has been developed and widely used in various studies due to its advantages. In this research, two-layered aluminum alloy 1050 was produced via CRB process with applying 50% reduction of thickness at ambient temperature and then using the 2D-DIC system to extract distribution of the strain field during the uniaxial tensile test at rolling direction. Strain in two directions of length and width was calculated, using DIC and strain in terms of thickness, effective strain, and anisotropy coefficient, using plasticity relationships. Moreover, for the first time, using the virtual field methods (VFM), elastic and plastic parameters such as elastic modulus, Poisson ratio, strength coefficient, strain hardening exponent, and yield stress were calculated. The results showed that the strength and microhardness were significantly increased due to the work hardening and increasing the density of dislocations, and the elongation and strain hardening exponent were reduced. The strength for the two-layered aluminum was 113MPa, which improved more than three times of the initial aluminum. Also, changes in the elastic parameters were very small and the modulus of elasticity for the primary aluminum and two-layered aluminum was 69.3 and 70GPa, respectively.

Keywords CRB Process; DIC Method; Elastic and Plastic Properties

CITATION LINKS

[1] Experimental investigation of plane stress fracture ... [2] Experimental investigation of fracture surfaces ... [3] Influence of different surface preparation methods ... [4] Interfacial conditions and bond strength in ... [5] Cold roll bonding of bimetallic sheets ... [6] Study of mechanisms of cold roll welding ... [7] Mechanism of solid state pressure ... [8] Investigation of mechanical properties, fractography ... [9] Experimental investigation of formability of aluminum ... [10] Experiment investigation of plane stress fracture ... [11] The system analysis of metal forming technique ... [12] Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass ... [13] Influence of processing parameters on the bond ... [14] Effects of processing parameters on the bond ... [15] Investigation of roll bonding between ... [16] Investigation of the parameters of the cold roll ... [17] The effect of annealing treatment on mechanical ... [18] The influence of roll bonding parameters ... [19] Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll ... [20] Study on the effect of presence of TiH₂ particles ... [21] Effect of friction, annealing conditions ... [22] Ultra-fine grained bulk steel produced by ... [23] Nano-grained copper strip produced by accumulative roll ... [24] Investigation of structure and mechanical ... [25] Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced ... [26] Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al ... [27] Bonding behavior during cold roll-cladding of tri-layered ... [28] Mechanical properties identification of sheet ... [29] Digital imaging techniques in experimental ... [30] Determination of global mechanical response ... [31] Mechanical behaviour of dissimilar friction stir ... [32] Characterizing the tensile behavior of additively ... [33] Use of digital image correlation to determine ... [34] Characterization of elastic constants of anisotropic ... [35] Local zone wise elastic and plastic properties ... [36] Microstructure and mechanical properties of Al/Cu/Mg ... [37] Experimental evaluation of the plane stress fracture ... [38] Experimental evaluation of forming limit diagram ... [39] Investigation of mechanical properties and microstructure ...

¹Mechanical Engineering School, Engineering College, University of Tehran, Tehran, Iran

²Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering School, North Kargar Avenue, Tehran, Iran. Postal Code: 1439957131
Phone: +98 (21) 61119956
Fax: +98 (21) 82083029
mrfarahani@ut.ac.ir

Article History

Received: July 05, 2018

Accepted: October 24, 2018

ePublished: February 01, 2019

ارزیابی خواص الاستیک و پلاستیک ورق آلومینیوم تولیدشده با فرآیند پیوند سردنوردی به روش همبستگی تصاویر دیجیتال

داود رحمت‌آبادی MSc

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علی شاه‌میرزالی MSc

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدرضا فراهانی PhD

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

رامین هاشمی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

فرآیند پیوند سردنوردی، یک فرآیند جوشکاری حالت جامد برای اتصال فلزات هم‌جنس و غیرهم‌جنس است. استفاده از مواد تولیدشده به روش پیوندنوردی برای کاربردهای مختلف و پیش‌بینی رفتار آنها در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نیازمند شناسایی کامل و دقیق خواص مکانیکی ماده است. همبستگی تصاویر دیجیتالی یک روش قدرتمند و غیرتماسی برای اندازه‌گیری میدان تغییرشکل ماده است. اخیراً روش همبستگی تصاویر دیجیتال توسعه یافته و به‌طور گسترده در تحقیقات مختلف استفاده می‌شود. در این تحقیق، ورق دولایه آلومینیوم آلیاژی ۱۰۵۰ با استفاده از روش پیوندنوردی با اعمال کاهش ضخامت ۵۰٪ در دمای محیط تولید و سپس از روش همبستگی تصویر دیجیتال دوبعدی برای به‌دست‌آوردن توزیع کامل میدان کرنش طی آزمون کشش تک‌محوره در جهت نورد استفاده شد. کرنش در دو جهت طول و عرض با روش همبستگی تصاویر دیجیتال و کرنش در راستای ضخامت، کرنش موثر و ضریب ناهمسانگردی با استفاده از روابط پلاستیسیته محاسبه شد. علاوه بر این برای اولین بار با استفاده از روش میدان مجازی، ثوابت الاستیک و پلاستیک نظیر مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، ضریب استحکام، توان کارسختی و تنش تسلیم محاسبه شد. نتایج نشان داد که به‌دلیل کارسختی و افزایش چگالی ناهنجاری مقدار استحکام و میکروسختی شدیداً افزایش و ازدیاد طول و توان کارسختی کاهش یافت. استحکام برای آلومینیوم دولایه به ۱۱۳ MPa رسید که نسبت به آلومینیوم دولایه بیش از سه برابر بهبود یافته است. همچنین تغییرات پارامترهای الاستیک بسیار اندک بوده و مدول الاستیسیته برای آلومینیوم دولایه و دولایه، به‌ترتیب GPa70 و ۶۹/۳ به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: فرآیند پیوند سردنوردی، روش همبستگی تصاویر دیجیتال، خواص الاستیک و پلاستیک

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۲

*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

پیوند نوردی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که برای اتصال فلزات مشابه یا غیرمشابه استفاده می‌شود. در این فرآیند دو یا چند فلز یا آلیاژ روی هم قرار داده و از غلطک‌های نورد عبور داده می‌شود [1, 2]. پس از تغییر شکل مناسب، یک جوش حالت جامد بین سطوح در تماس فلز ایجاد خواهد شد. قابل ذکر است که قبل از اعمال نورد، باید سطوح در تماس کاملاً تمیز شوند. مطابق با نظر ژانگ و بای، دو روش رایج برای حذف آلاینده‌ها و اکسیدهای سطحی، تمیزکردن شیمیایی و مکانیکی است [3]. جوش نوردی، متأثر از پارامترهای مختلفی است که توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نرخ کرنش یا زمان جوشکاری نوردی توسط وایدیارات و همکاران در سال ۱۹۵۹ بررسی شد [4]. پین و همکاران به بررسی اثر دما بر استحکام پیوند پرداختند [5]. دانش‌منش و کریمی‌طاهری به بررسی اثر درصد تغییر شکل حین نورد در دماهای مختلف پرداختند [6]. وایدیارات و همکاران در سال ۱۹۵۹ و بعدها محمد و

و/شبرن در سال ۱۹۷۵ ادعا کردند که مکانیزم اتصال نوردی براساس تئوری فیلم است و به‌دلیل دمای پایین، فرآیند تئوری فیلم نقش اصلی در ایجاد اتصال را ایفا می‌کند [4, 7]. با توجه به این نظریه، لایه‌های سطحی از فلز ترد حین نورد به‌دلیل اعمال کرنش بالا در دمای محیط شکسته می‌شوند و فلز پایه در شکاف لایه‌های شکسته اکستروود می‌شود. ژانگ و بای در سال ۱۹۹۴ یک پارامتر تحت عنوان کاهش ضخامت آستانه را تعریف کردند که حداقل میزان کاهش ضخامت یا تغییر شکل برای اتصال فلزات مختلف با استفاده از پیوند نوردی بود [3]. در تغییرات بیشتر از کاهش ضخامت بحرانی، مناطق تمیز در بین ترک‌ها اکستروود می‌شوند تا جوش مناسب برقرار شود. بنابراین برای فرآیند جوش نوردی، آماده‌سازی سطوح و کاهش ضخامت مناسب پارامترهای اساسی هستند و در صورتی که یکی از آنها درست انجام نشود، اتصالی برقرار نمی‌شود. همچنین نمونه تولیدی با روش جوش نوردی به‌دلیل 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 یابد [8-10]. علاوه بر دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، این روش بسیار ساده و بدون نیاز به تجهیزات با توان بالا است و پین و همکاران در سال ۱۹۸۹، پیوند نوردی را از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌ترین و مناسب‌ترین روش برای تولید ورق و فویل پوشش‌داده‌شده معرفی کردند [5].

تاکنون پارامترهای فرآیند پیوند نوردی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [11-13]، درجه حرارت اتصال [14, 15]، زمان آنیلینگ قبل و بعد از فرآیند [16-18]، سرعت نورد [14, 16]، ضخامت اولیه [14, 16]، جهت نورد [16]، حضور ذرات بین ورق [19, 20]، شکل‌دهی [9] و چقرمگی شکست [1, 10] برای مواد مختلف آلومینیوم [21]، فولاد [22]، مس [23]، کامپوزیت آلومینیوم-مس [24]، کامپوزیت آلومینیوم-تیتانیوم [25]، کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم [26]، آلومینیوم-برنج [27] و غیره بررسی شده است. همان‌طور که اشاره شد، با استفاده از روش پیوند نوردی، مواد و کامپوزیت‌های لایه‌ای زیادی تولید شده و اکثراً خواص مکانیکی، متالورژیک، اتصال و پارامترهای موثر بر آنها مورد بررسی قرار گرفته است و تاکنون تحقیقی در زمینه شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک برای استفاده در نرم‌افزارهای عددی به‌منظور پیش‌بینی رفتار ماده تولیدشده به روش پیوند نوردی در شرایط مختلف انجام نشده است. درک درست از خواص مکانیکی مواد به‌خصوص مواد جدید نظیر مواد تولیدشده به روش پیوند نوردی در طراحی و مدل‌سازی اجزایی که از این مواد استفاده می‌شود، بسیار مهم و حیاتی است. یکی از علل عدم بررسی در زمینه ثوابت مواد جدید، دقت پایین روش‌های قدیمی و هزینه بالای روش‌های نوین است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و کرنش مانند روش کرنش‌سنج، تداخل و همبستگی تصاویر دیجیتال ارایه شده است. در روش کرنش‌سنج که قبلاً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گرفت، میزان خطا در کرنش اندازه‌گیری‌شده در ناحیه گلوبی تا شکست بسیار زیاد بوده و گزارش شده است که فقط تا نقطه گلوبی دارای دقت مناسب است [28]. در مقابل، این محدودیت در روش همبستگی تصاویر دیجیتال وجود ندارد. یکی از مزایای روش همبستگی تصاویر دیجیتال، اندازه‌گیری میدان کامل جابه‌جایی و کرنش در کل ناحیه تغییر شکل پلاستیک است. این روش، یکی از روش‌های نوین است که در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، علاوه بر محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش کل می‌توان خواص الاستیک و

مکانیکی مانند ضریب ناهمسان‌گردی بر حسب کرنش موثر، منحنی تنش-کرنش (در دو جهت طول و عرض با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و در راستای ضخامت با استفاده از روابط پلاستیسیته) به‌صورت پیوسته حین آزمون کشش محاسبه شد.

۲- روش همبستگی تصاویر دیجیتال

روش همبستگی تصاویر دیجیتال، روش اپتیک و غیرتماسی است و با گسترش آن در سال‌های اخیر، با توجه به قیمت پایین، در دسترس بودن تجهیزات تصویربرداری و نرم‌افزار همبستگی به یک ابزار تحلیلی محبوب برای برنامه‌های کاربردی مکانیک سازه تبدیل شده است [30]. روش همبستگی تصاویر دیجیتال، یک روش قابل اعتماد برای به‌دست‌آوردن تجربی میدان‌های کرنش و جابه‌جایی است. در این روش قبل و بعد بارگذاری از نمونه، عکس گرفته و به‌صورت دیجیتال ذخیره می‌شود. اساس این روش، مقایسه تصویر نمونه‌هایی بوده که با الگوی تصادفی پوشانده شده است. به‌منظور مقایسه بهتر، نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده می‌شوند و بعد از خشک‌شدن، نقاط سیاه‌رنگ به‌صورت تصادفی روی نمونه‌ها ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و ارتباط بین عکس‌ها، جابه‌جایی‌ها و مشتقات آنها به دست می‌آید. همچنین تابع همبستگی تصاویر دیجیتال به‌صورت ردگیری موقعیت الگوهای تعیین‌شده عکس اول در عکس‌های بعدی و استخراج مختصات طول و عرض آنها است. ترتیب کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتال برای ردگیری موقعیت الگوی عکس اول در عکس‌های بعدی نیز براساس تطابق میزان شدت نور خاکستری است. از آنجایی که اغلب استفاده از یک پیکسل منفرد برای یافتن نقطه انطباق غیرممکن است، از یک ناحیه با چندین پیکسل استفاده می‌شود تا فرآیند انطباق انجام پذیرد. این ناحیه دارای یک توزیع منحصربه‌فرد از شدت نور است که بعد از فرآیند تغییر شکل، با یافتن ناحیه‌ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییر شکل، جابه‌جایی زیرمجموعه مذکور پیدا می‌شود. همچنین در این روش برای افزایش رزولوشن اندازه‌گیری مقادیر شدت نور برای هر پیکسل توسط توابع، درون‌یابی می‌شود تا بتوان جابه‌جایی در گستره صدم پیکسل را نیز شناسایی نمود. دقت در این روش تحت تاثیر تعداد پیکسل‌های داخل عکس و اندازه سلول‌های مورد بررسی، تابع درون‌یاب و غیره است. از مزیت‌های روش همبستگی تصاویر دیجیتال می‌توان به دقت بالای روش، چیدمان ساده سیستم، اندازه‌گیری پیوسته و حساسیت کمتر به شرایط آزمایش سخت مانند دمای بالا، فشار بالا و مواد تهاجمی، غیرمخرب بودن و عدم نیاز به تماس به سطح قطعه اشاره نمود.

طبق شکل ۱، تطبیق الگو مبتنی بر دریافت حداکثر همبستگی بین زیرمجموعه‌ای از تصویر در حالت‌های تغییر شکل‌نیافته و تغییر شکل‌یافته است. از معادله ۱ به‌عنوان تابع همبستگی برای تطبیق استفاده می‌شود [35]. جابه‌جایی مرکز زیرمجموعه پیکسل‌ها هنگامی که بهترین تطابق شناسایی شد، ثبت می‌شود. میدان‌های کرنش از گرادیان میدان‌های جابه‌جایی با استفاده از یک روش تمایز عددی مطابق با معادلات ۲ و ۳ به دست می‌آید [35].

(۱)

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

پلاستیک ماده حین آزمون‌های کشش، فشار و غیره را محاسبه کرد. روش همبستگی تصاویر دیجیتال، در ابتدا به‌عنوان یک روش برای اندازه‌گیری جابه‌جایی توسط پترس و رانسون در دانشگاه کارلینا معرفی شد [29]. پترس و رانسون یک الگوریتم همبستگی را برای همبستگی یک مجموعه از پیکسل‌ها بین عکس مرجع و تصاویر تغییر شکل استفاده کردند. در سال‌های بعد، روش همبستگی تصاویر دیجیتال در افزایش سرعت، بهبود دقت همبستگی و غیره شدیداً توسعه یافت. به‌دلیل مزایای روش همبستگی تصاویر دیجیتال، استفاده از این روش برای به‌دست‌آوردن خواص مکانیکی مواد گسترش یافته و طی چند سال گذشته با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، خواص مکانیکی مواد مختلف مانند ورق‌های فلزی، آلیاژها و کامپوزیت‌های تولیدشده به روش‌های گوناگون مانند جوش، لیزر، روش‌های تولید افزودنی، متالورژی تولید، ذوب پرتوی الکترونی و غیره مورد بررسی قرار گرفته است.

شاه‌میرزآلو و فرهانی از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای تعیین خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۵ استفاده کردند [30]. 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 [30]. آنها همچنین در این کار به بررسی اندازه زیرمجموعه روی ضریب همبستگی پرداختند و مقدار بهینه برای پردازش تصویر را تعیین نمودند. همچنین با توجه به قابلیت منحصربه‌فرد این روش مطالعات گسترده‌ای در زمین تعیین خواص مواد به‌صورت موضعی و در نواحی مختلف جوش‌شده انجام شده است. فیستائر و همکاران [31] به بررسی خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی و اغتشاشی غیرمشابه آلومینیوم و منیزیم پرداختند. آنها از روش کرنش‌نگاری دیجیتال برای به‌دست‌آوردن کرنش موضعی در اتصال غیرمشابه و نمودار تنش-کرنش در نقاط مختلف جوش با ساختار متالورژیک متفاوت استفاده کردند و نشان دادند که نتایج میکروسختی و کرنش‌نگاری در شناسایی نقطه ضعف جوش (استحکام نهایی پایین) کاملاً همخوانی دارد. فوهرینگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، خواص مکانیکی تیتانیوم تولیدشده با فرآیند روش‌های تولید افزودنی (AM) حین آزمون کشش تک‌محوره را محاسبه کردند [32]. سانچز-ارولو و پولوس [33] نیز از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای شناسایی خواص الاستیک و پلاستیک آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژهای حافظه‌دار، استفاده و این روش را یک روش مناسب، با دقت کافی و ارزان‌قیمت برای شناسایی خواص ماده معرفی کردند. نگوین و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی خواص مکانیکی ورق‌های فلزی آلومینیوم و فولاد استحکام بالا با روش همبستگی تصاویر دیجیتال پرداختند [28]. ارل و همکاران در سال ۲۰۱۸، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، ثابت الاستیک و ضریب ناهمسان‌گردی در جهت‌های مختلف را برای کامپوزیت‌ها محاسبه کردند [34]. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای به‌دست‌آوردن خواص مختلف مواد به‌عنوان یک روش مدرن و کارآمد در حال گسترش است.

در این تحقیق، ورق آلومینیومی با استفاده از پیوند نوردی، در دمای محیط و اعمال کاهش ضخامت ۵۰٪ تولید شد. برای اولین بار ثوابت الاستیک و پلاستیک مواد تولیدشده به روش پیوند نوردی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال حین آزمون کشش تک‌محوره در جهت نورد محاسبه شد. همچنین تغییرات خواص

۳، قبل از آزمون کشش، نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده شدند و بعد از خشک شدن، نقاط سیاه‌رنگ به صورت تصادفی روی نمونه‌ها ایجاد شد. بعد از آماده‌سازی سطح، آزمون کشش در دمای اتاق با استفاده از دستگاه کشش گوتک با ظرفیت ۱۵۰ کیلو نیوتن و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. مطابق با شکل ۴، برای اندازه‌گیری کرنش در دو جهت عرضی و طولی از سیستم DIC دو بُعدی استفاده شد. برای ثبت تصاویر از دوربین با رزولوشن ۲۴۸۸×۲۰۴۸ پیکسل استفاده شد. همچنین به منظور بررسی آزمون میکروسختی، نمونه‌هایی در جهت عمود بر نور (صفحه ضخامت-طول) بریده و به منظور سهولت در جابه‌جایی و انجام آزمون میکروسختی ویکرز از مانت سرد استفاده شد. قبل از انجام آزمون، سنباده‌زنی با شماره‌های ۱۲۰۰-۸۰۰ برای آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شد. آزمون میکروسختی، با اعمال نیروی ۱/۹۶N در دمای اتاق و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه برای بیش از ۱۰ نقطه مختلف به صورت تصادفی صورت گرفت. نهایتاً، مقادیر میکروسختی با حذف بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین داده و میانگین‌گیری از مابقی داده‌ها برای آلومینیوم اولیه و آلومینیوم دولایه تولید شده به روش پیوند سرد نوردی گزارش شد.



شکل ۳ (a) قبل، (b) بعد از آماده‌سازی سطحی نمونه‌های آزمون کشش قبل و بعد از آماده‌سازی سطحی؛ (a) قبل، (b) بعد از آماده‌سازی سطحی



شکل ۴ راه‌اندازی آزمون کشش همراه با تجهیزات همبستگی تصاویر دیجیتال

۴- اندازه‌گیری خواص الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها

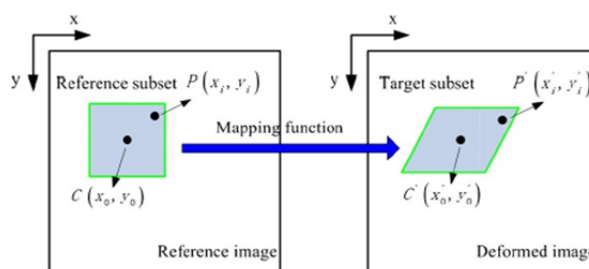
۴-۱- روش میدان مجازی (VFM)

روش میدان مجازی براساس اصل کار مجازی بوده که شکل ضعیف شده از معادلات تعادلی موضعی و میدان‌های جابه‌جایی مجازی و قابل قبول جنبشی است و برای استخراج پارامترها به کار

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

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

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

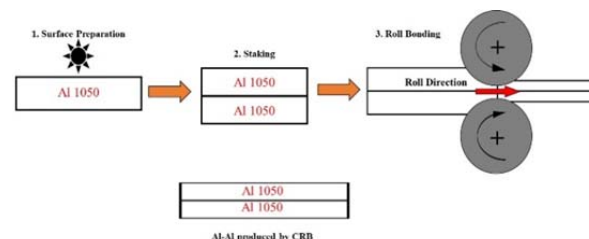


شکل ۱ شماتیک تطابق زیرمجموعه در روش همبستگی تصاویر دیجیتال؛ تغییر شکل نیافته (چپ)، تغییر شکل یافته (راست)

۳- روش تحقیق

۳-۱- پیوند نوردی

در این تحقیق از آلومینیوم آلیاژی ۱۰۵۰ آنیل شده با ضخامت یک میلی‌متر به عنوان ورق اولیه استفاده شد. در شکل ۱، مراحل مختلف فرآیند پیوند نوردی شامل مراحل آماده‌سازی اولیه، روی هم قراردادن نمونه‌ها و نورد ارایه شده است. براساس شکل ۲، به منظور ساخت ورق دولایه آلومینیومی با استفاده از پیوند نوردی، در ابتدا دو نمونه آلومینیوم ۱۰۵۰ با ابعاد یکسان (۱۲۵ میلی‌متر طول و ۷۵ میلی‌متر عرض) آماده شد. سپس نمونه‌ها تحت عملیات چربی‌زدایی مکانیکی شامل خراشیدن سطوح در تماس با استفاده از سنباده خورشدی و چربی‌زدایی شیمیایی با قراردادن نمونه‌ها در حمام استون قرار گرفتند. همچنین قبل از عملیات نورد، نمونه‌ها از چهار طرف، سوراخ و برای جلوگیری از سُرخوردن حین نورد با سیم فولادی محکم به هم بسته شدند و سپس عملیات نورد با اعمال کاهش ضخامت ۵۰٪ انجام شد [8-10]. همچنین به منظور جلوگیری از اکسید شدن سطوح، با کاهش فاصله زمان آماده‌سازی تا عملیات نورد می‌توان پیوند قوی‌تری بین لایه‌ها ایجاد کرد [36-38].



شکل ۲ شماتیک فرآیند نورد سرد پیوندی

۳-۲- آزمایش کشش تک‌محوره و میکروسختی

به منظور بررسی خواص الاستیک و پلاستیک، ورق دولایه آلومینیومی تولید شده به روش پیوند نوردی، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M-9 در ابعاد ۱۲ در ۶ میلی‌متر آماده شد. مطابق با شکل

۴-۲- محاسبه پارامترهای الاستیک

در این بخش هدف از بررسی پارامترهای الاستیک، مدول یانگ و ضریب پواسون است. برای این منظور، از معادله ۸ استفاده می‌شود. پارامترهای معلوم از آزمون کشش و روش همبستگی تصاویر دیجیتال، کرنش روی سطح S_V و نیروی عکس‌العمل $F(t_i)$ است [30]. به منظور معرفی پارامترهای نامعلوم و کرنش واقعی اندازه‌گیری شده با استفاده از روش DIC در معادله ۸، تانسور تنش با پارامترهای داده شده در معادله ۹ جای‌گذاری می‌شود [35]. باید توجه نمود که فرض تنش صفحه‌ای به کار برده شده و ϵ_{ij} کرنش واقعی اندازه‌گیری شده روی سطح S_V با استفاده از روش DIC است.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{1+\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

اکنون معادله ۸ به معادله ۱۰ تبدیل می‌شود و متغیرهای ناشناخته کرنش واقعی اندازه‌گیری شده روی سطح، نیروی عکس‌العمل، کرنش و جابه‌جایی مجازی است. آشکار است که این معادله باید شرایط مرزی آزمون را از طریق میدان پیوسته ارضا کند.

$$\begin{aligned} \frac{1}{b} F(t_i).u_i^* &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\int_{S_v} \epsilon_{xx} \epsilon_{xx}^* dS_v \right. \\ &\quad \left. + \int_{S_v} \epsilon_{yy} \epsilon_{yy}^* dS_v \right) \\ &\quad + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \left(\int_{S_v} \epsilon_{xx} \epsilon_{yy}^* dS_v \right. \\ &\quad \left. + \int_{S_v} \epsilon_{yy} \epsilon_{xx}^* dS_v \right) \\ &\quad + \frac{E}{1+\nu} \left(\int_{S_v} \epsilon_{xy} \epsilon_{xy}^* dS_v \right) \end{aligned} \quad (10)$$

چون توزیع کرنش با استفاده از روش DIC به صورت تابع پیوسته روی سطح نیست، ولی مقادیر آنها در نقاط مرکز که زیرمجموعه نامیده می‌شود، گسسته است، در نتیجه معادله ۱۰ می‌تواند به صورت تجمعی روی سطح به صورت معادله ۱۱ بازنویسی شود، [30, 35]

$$\begin{aligned} \frac{E}{1-\nu^2} &\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_{xx} \epsilon_{xx}^* \Delta S_v + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_{yy} \epsilon_{yy}^* \Delta S_v \right) \\ &\quad + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_{xx} \epsilon_{yy}^* \Delta S_v \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_{yy} \epsilon_{xx}^* \Delta S_v \right) \\ &\quad + \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_{xy} \epsilon_{xy}^* \Delta S_v \right) \\ &= \frac{1}{b} F(t_i).u_i^* \end{aligned} \quad (11)$$

برده می‌شود. در اینجا اساس معادلات و روش استفاده شده برای حل پارامترهای الاستیک و پلاستیک با استفاده از VFM به صورت جزیی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۵، نمودار شرایط بارگذاری و مرزی نمونه آزمون کشش را نشان می‌دهد [35]. منطقه مورد نظر (AOI) در شکل ناحیه‌ای است که مقادیر کرنش توسط روش همبستگی تصاویر دیجیتال اندازه‌گیری شد. پارامترهای شناخته شده، نیروی عکس‌العمل F و توزیع کرنش روی منطقه مورد نظر بوده و معادله اساسی حاکم از VFM در معادله ۴ ارایه شده است. این معادله شکل ضعیف شده از مشتق معادله تعادلی با استفاده از اصل کار مجازی است [30, 35].

$$\begin{aligned} \int_V \sigma_{ij} : \epsilon_{ij}^* dv + \int_{S_f} \bar{T}_i . u_i^* ds \\ + \int_V b_i . u_i^* dv \\ = \int_V \rho a_i . u_i^* dv \end{aligned} \quad (4)$$

چون حجم و نیروهای اینرسی سهم ناچیزی نسبت به کل کار انجام شده دارند، بنابراین معادله ۴ می‌تواند به صورت معادله ۵ ساده شود [30, 35].

$$\int_V \sigma_{ij} : \epsilon_{ij}^* dv = \int_{S_f} \bar{T}_i . u_i^* ds \quad (5)$$

در شرایط تنش صفحه‌ای که حالت تنش دو بُعدی است، با فرض این که هیچ نوع تغییر تنش در امتداد ضخامت نداریم، معادله ۵ می‌تواند به معادله ۶ تغییر کند. پارامتر b ضخامت نمونه است [35].

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

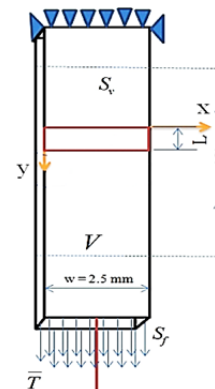
همچنین نیروی عکس‌العمل F مربوط به زمان t_i می‌تواند به صورت زیر باشد:

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

با جای‌گذاری معادله ۷ در معادله ۶، معادله ۸ به دست می‌آید.

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

معادله بالا، ساده شده معادله VFM است که برای شناسایی پارامترهای الاستیک و پلاستیک استفاده می‌شود و روشی است که در ادامه بیشتر توضیح داده می‌شود.



شکل ۵) نمودار شرایط بارگذاری و مرزی نمونه آزمون کشش [30]

پارامترهای ناشناخته (مدول یانگ و ضریب پواسون) می‌توانند با حل نمودن معادله بالا استخراج شوند.

۲-۴ محاسبه پارامترهای پلاستیک

از آنجایی که در ناحیه پلاستیک، رفتار ماده، خطی (مانند حالت الاستیک) نیست، امکان استخراج پارامترهای پلاستیک تنها از طریق کرنش و داده‌های نیرو مانند حالت الاستیک برای روش VFM وجود ندارد. در یک پژوهش، پارامترهای پلاستیک را با روش VFM با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب استخراج نمودند. به منظور دستیابی به پارامترهای ناشناخته، میدان جابه‌جایی مجازی استفاده شده است. پس از جای‌گذاری این میدان، جابه‌جایی مجازی و کرنش مجازی مربوط به آن در معادله ۸، معادله ۱۲ به صورت زیر حاصل می‌شود [35]:

$$\int_{S_v} \sigma_{ij} dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \quad (12)$$

حال با جای‌گذاری σ_{ij} در مدل ماده $\sigma_{yy} = K(\epsilon_{yy} - (\frac{\sigma_{ys}}{E}))^n$ معادله ۱۳ به دست می‌آید [35].

$$\int_{S_v} K(\epsilon_{yy} - (\frac{\sigma_{ys}}{E}))^n dS_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \quad (13)$$

از آنجایی که در روش DIC، داده‌های کرنش به صورت پیوسته استخراج نمی‌شوند و با توجه به اندازه گام انتخاب شده به دست می‌آیند، بنابراین انتگرال در معادله ۱۳ به یک مجموعه سری و معادله ۱۴ تبدیل می‌شود که N تعداد داده‌های کرنش در منطقه مورد نظر بررسی است [30].

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K(\epsilon_{yy} - (\frac{\sigma_{ys}}{E}))^n \Delta S_v = \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \quad (14)$$

پارامترهای معلوم در معادله بالا، مدول یانگ، L ، $F(t_i)$ ، ΔS_v ، ϵ_{yy} و N هستند. به منظور دستیابی به پارامترهای ناشناخته (k, n, σ_{ys}) ، یک تابع مقدار همان طور که در زیر نشان داده شده، توسعه داده شده است [30, 35].

$$f = \sum_{t_1}^{t_n} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K(\epsilon_{yy} - (\frac{\sigma_{ys}}{E}))^n \Delta S_v - \frac{1}{b} F(t_i) \cdot L \right]^2 \quad (15)$$

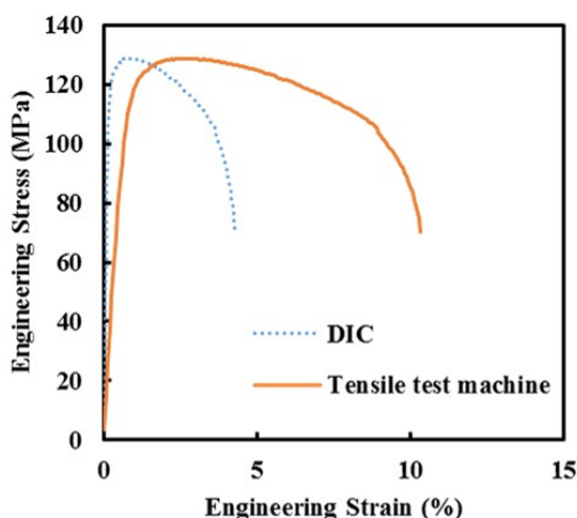
که t_1 تا t_n گام‌های بارگذاری در منطقه تغییر شکل پلاستیک هستند. به حداقل رساندن تابع مقدار در معادله ۱۵ به شناسایی پارامترهای ناشناخته می‌انجامد [35].

مشق آزاد طرح بهینه‌سازی شده چندمتغیره و الگوریتم نلدر-مید برای حل پارامترهای ناشناخته استفاده شده است. الگوریتم نلدر-مید همچنین به عنوان روش ساده سراسیمی شناخته شده که یک تکنیک برای به حداقل رساندن تابع هدف در یک فضای چندبعدی است. برای شروع در حل معادله، یک حدس اولیه نیاز است. حتی حدس‌های اولیه نامناسب هم در پایداری نتایج تأثیر نخواهد داشت، با این حال برای رسیدن به همگرایی سریع‌تر، حدس‌های اولیه براساس نمونه شاهد در نظر گرفته می‌شود. جعبه ابزار بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB برای به حداقل رساندن فرآیند استفاده شده است.

۵- ارایه نتایج و بحث

در نمودار ۱، نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی با استفاده از روش همبستگی

تصاویر دیجیتال و ماشین آزمون کشش ارایه شده است. طبق نمودار ۱ مشاهده می‌شود که به دلیل تفاوت در شیب ناحیه خطی، مقدار کرنش اندازه‌گیری شده در ماشین کشش در همان ابتدای کار (ناحیه الاستیک) بیشتر است. این اختلاف شیب منحنی تنش-کرنش در ناحیه الاستیک بیانگر تفاوت در مقدار مدول الاستیسیته است. همچنین علاوه بر تفاوت در شیب ناحیه الاستیک، در ناحیه پلاستیک نیز تفاوت در مقادیر کرنش و حتی شیب منحنی وجود دارد. این اختلاف ناشی از خطای اندازه‌گیری کرنش با ماشین آزمون کشش، به دلیل نامناسب بودن، لقی و عدم صلیبت در گیره‌ها، سُرخوردن نمونه‌های کشش حین بارگذاری است و با انتخاب قید و بند مناسب برای جلوگیری از خطاهای اشاره شده، امکان دستیابی به نتایج با خطای کمتر و درصد شباهت بیشتر با روش همبستگی تصاویر دیجیتال فراهم می‌شود. یکی دیگر از عوامل بروز خطا و اختلاف، دقت پایین سیستم اندازه‌گیری کرنش دستگاه کشش نسبت به روش همبستگی تصاویر دیجیتال است.



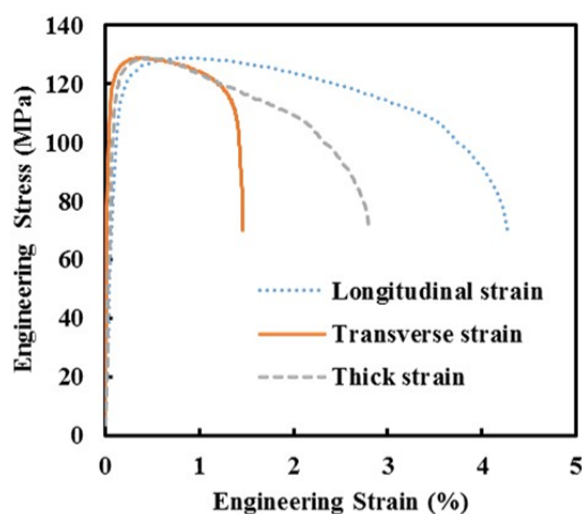
نمودار ۱) نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی

برای بررسی اختلاف مقدار کرنش، نمودار تنش-کرنش را به دو ناحیه تغییر شکل یکنواخت (از نقطه تسلیم تا گلوئی) و تغییر شکل غیریکنواخت (از گلوئی تا شکست) تقسیم می‌کنیم. همان طور که مشاهده می‌شود، در ناحیه پلاستیک با افزایش کرنش، میزان خطای اندازه‌گیری در ماشین کشش افزایش می‌یابد و این اختلاف در ناحیه دوم بسیار بیشتر است.

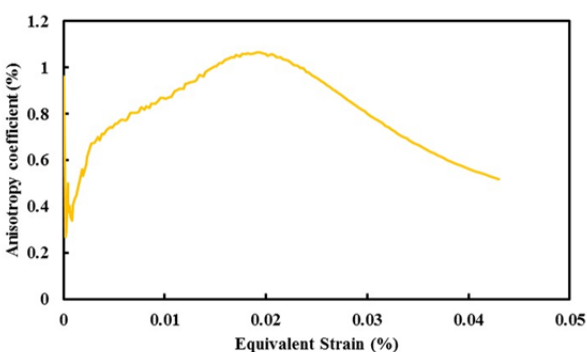
در جدول ۱، پارامترهای الاستیک ماده (مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تنش تسلیم) برای نمونه اولیه (آلومینیوم خالص) و آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی ارایه شده است. مطابق با نتایج ارایه شده در جدول ۱، مقدار مدول الاستیسیته به دست آمده برای آلومینیوم اولیه و آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی به هم نزدیک بوده و به ترتیب برابر با ۶۹/۳ و حدود ۷۰ گیگاپاسکال است. به همین ترتیب، مقادیر ضرایب پواسون نیز برای هر دو نمونه تقریباً یکسان بوده، ولی مقدار استحکام تسلیم برای آلومینیوم دولایه بیش از سه برابر آلومینیوم اولیه بوده که به دلیل اعمال کرنش زیاد (کرنش معادل ۰/۸ در هر پاس نورد) در دمای محیط (کار سختی) و افزایش چگالی نابه‌جایی است [2, 36, 39]. نتایج آزمون میکروسختی نشان داد که مقدار متوسط میکروسختی ویکرز به دست آمده برای آلومینیوم اولیه و

جدول ۳ تغییرات ناهمسان‌گردی بر حسب کرنش طولی در حین آزمون کشش تک‌محوره برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی

کرنش مهندسی در راستای طول (%)	ضریب ناهمسان‌گردی (%)
۰/۱۵	۰/۴۹۵
۰/۳۰	۰/۶۷۶
۰/۵۰	۰/۷۵۸
۰/۷۵	۰/۸۳۰
۰/۹۹	۰/۸۴۲
۱	۰/۸۶۵
۱/۱۹۱	۱/۰۶۴
۱/۵	۱/۰۰۴
۲	۱/۰۵۸
۲/۵	۰/۹۵۸
۳	۰/۸۱۰
۳/۵	۰/۶۵۴
۴	۰/۵۶۰
۴/۲۶	۰/۵۱۸



نمودار ۲ نمودارهای تنش-کرنش مهندسی در کرنش‌های مختلف طولی، عرضی و ضخامتی برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی



نمودار ۳ تغییرات ناهمسان‌گردی بر حسب کرنش موثر در حین آزمون کشش تک‌محوره برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی

۶- نتایج

در این مقاله، آلومینیوم دولایه به روش پیوند سرد نوردی با اعمال کاهش ضخامت ۵۰٪ در دمای محیط، بدون استفاده از روان‌کار و با نورد آزمایشگاهی ظرفیت ۲۰٪ با موفقیت، تولید و برای اولین بار، پارامترهای الاستیک و پلاستیک، ضریب ناهمسان‌گردی و منحنی تنش و کرنش در جهت‌های مختلف با استفاده از روش نوین همبستگی تصاویر دیجیتال، اندازه‌گیری شد و نتایج زیر به

آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی به‌ترتیب برابر با ۲۲/۵ و ۴۶/۷ بوده که به‌دلیل کارسرد و افزایش چگالی نابه‌جایی، سختی نیز مانند استحکام افزایش چشمگیری داشته است. همچنین در جدول ۲، پارامترهای پلاستیک شامل ضریب استحکام، توان کرنش سختی و ضریب ناهمسان‌گردی ارایه شده است. طبق نتایج جدول ۲، مشاهده می‌شود که با افزایش کرنش اعمالی به‌دلیل افزایش چگالی نابه‌جایی استحکام آلومینیوم دولایه نسبت به آلومینیوم اولیه، افزایش و کارپذیری آن به‌دلیل اعمال کار مکانیکی کاهش می‌یابد.

جدول ۱ پارامترهای الاستیک محاسبه‌شده با همبستگی تصاویر دیجیتال

ماده	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
آلومینیوم ۱۰۵۰	۳۷	۶۹/۳	۰/۳۱۰
آلومینیوم دولایه	۱۱۳	۷۰	۰/۳۰۱

جدول ۲ پارامترهای پلاستیک محاسبه‌شده با همبستگی تصاویر دیجیتال

ماده	ضریب استحکام (MPa)	توان کارسختی	ضریب ناهمسان‌گردی
آلومینیوم ۱۰۵۰	۱۲۰/۷	۰/۲۱۴	۱/۵۱
آلومینیوم دولایه	۱۶۵/۱	۰/۰۴۹	۱/۰۶۴

مقدار کرنش در راستای عرض و طول نمونه حین آزمون کشش از قسمت قبلی و با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شد. برای به‌دست آوردن کرنش در راستای ضخامت از رابطه ثابت‌بودن حجم (معادله ۱۶) در تغییر شکل پلاستیک استفاده می‌شود. در نمودار ۲، نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی برای کرنش در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کرنش اعمالی در ناحیه الاستیک و شیب آن تقریباً یکسان است و 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 به‌دلیل عملیات نورد است. در ادامه در رابطه با ضریب ناهمسان‌گردی توضیحات بیشتری ارایه می‌شود.

ضریب ناهمسان‌گردی در ورق‌ها مطابق با معادله ۱۷ به‌صورت نسبت کرنش پلاستیک در راستای عرض به کرنش پلاستیک در ضخامت تعریف می‌شود. در نمودار ۳، مقدار ناهمسان‌گردی پلاستیک بر حسب کرنش موثر برای آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی، ارایه و برای محاسبه کرنش موثر از معادله ۱۸ استفاده شده است. همچنین در جدول ۲، خواص پلاستیک و در جدول ۳، تغییرات ناهمسان‌گردی بر حسب کرنش مهندسی ارایه شده است. مشاهده می‌شود که مقدار ناهمسان‌گردی برای آلومینیوم دولایه با افزایش کرنش افزایش می‌یابد و کمی پس از نقطه گلوپی کاهش می‌یابد. ضریب ناهمسان‌گردی در نقطه گلوپی و شکست به‌ترتیب ۰/۸۴۲ و ۰/۵۱۸ به دست آمده و مقدار حداکثر آن در کرنش مهندسی ۱/۱۹۱ برابر با ۱/۰۶۴ است.

$$\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0 \quad (16)$$

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w)$$

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_l + \varepsilon_w)} \quad (17)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_l^2 + \varepsilon_w^2 + \varepsilon_t^2)} \quad (18)$$

تانسور تنش (MPa)	σ_{ij}
تنش تسلیم (MPa)	σ_y
تنش کششی نهایی (MPa)	σ_{UTS}
ضریب پواسون	ν

منابع

- 1- Rahmatabadi D, Mohammadi B, Hashemi R, Shojaee T. Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(5):166-174. [Persian]
- 2- Rahmatabadi D, Hashemi R. Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(10):305-312. [Persian]
- 3- Zhang W, Bay N. Influence of different surface preparation methods on the bond formation in cold pressure welding. Eurojoin 2: 2nd European Conference on Joining Technology Florence, 16-18 May, 1994, Florence, Italy. Florence: Italian Institute of Welding; 1994. pp. 379-388.
- 4- Wright PK, Snow DA, Tay CK. Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling. Metals Technology. 1978;5(1):24-31.
- 5- Pan D, Gao K, Yu J. Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips. Materials Science and Technology. 1989;5(9):934-939.
- 6- Danesh Manesh H, Karimi Taheri A. Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip. Materials Science and Technology. 2004;20(8):1064-1068.
- 7- Mohamed HA, Washburn J. Mechanism of solid state pressure welding. Welding Journal. 1975;54:302s-310s.
- 8- Rahmatabadi D, Tayyebi M, Hashemi R. Investigation of mechanical properties, fractography and microstructure of layered Al/Cu composite produced by cold roll bonding. Science and Technology of Composites. 2017;4(3):311-318. [Persian]
- 9- Rahmatabadi D, Hashemi R. Experimental investigation of formability of aluminum sheets produced by cold roll bonding process used by Nakazima test. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(3):451-454. [Persian]
- 10- Rahmatabadi D, Hashemi R, Mohammadi B, Shojaee T. Experiment investigation of plane stress fracture toughness for aluminum sheets produced by cold roll bonding process. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(2):101-108. [Persian]
- 11- Lukaschkin ND, Borissow AP, Erlikh AI. The system analysis of metal forming technique in welding processes. Journal of Materials Processing Technology. 1997;66(1-3):264-269.
- 12- Wu HY, Lee Sh, Wang JY. Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys. Journal of Materials Processing Technology. 1998;75(1-3):173-179.
- 13- Quadir MZ, Wolz A, Hoffman M, Ferry M. Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminium strip. Scripta Materialia. 2008;58(11):959-962.
- 14- Abbasi M, Toroghinejad MR. Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips. Journal of Materials Processing Technology. 2010;210(3):560-563.
- 15- Eizadjou M, Danesh Manesh H, Janghorban K. Investigation of roll bonding between aluminum alloy

۱- همان طور که پیش‌بینی می‌شد، مقدار ثابت‌های الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون) برای هر دو نمونه آلومینیوم اولیه و آلومینیوم دولایه تولیدشده به روش پیوند نوردی تقریباً یکسان به دست آمد. مقدار مدول الاستیسیته در نمونه اولیه و آلومینیوم دولایه به ترتیب ۶۹/۳ و ۷۰ GPa گزارش شد.

۲- به دلیل اعمال کارسرد، کارسختی و افزایش چگالی نابه‌جایی، مقدار استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و میکروسختی ویکرز به شدت افزایش و میزان کارپذیری آلومینیوم دولایه نسبت به آلومینیوم اولیه کاهش یافت. استحکام تسلیم از ۳۷ مگاپاسکال به حدود ۱۱۳ مگاپاسکال و میکروسختی از ۲۲/۵ به ۴۶/۷ ویکرز بهبود یافت که بیانگر افزایش بیش از سه‌برابری در استحکام و دوبرابری در سختی است.

۳- همچنین مقدار ازدیاد طول مهندسی و واقعی در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت و کرنش موثر با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال محاسبه شد و نتایج نشان داد که به دلیل ناهمسان‌گردی پلاستیک ناشی از فرآیند نورد، مقادیر کرنش در جهات مختلف اختلاف دارد و نمودار ضریب ناهمسان‌گردی بر حسب کرنش موثر نشان داد که مقدار ناهمسان‌گردی حین آزمون کشش تک‌محوره تا نقطه گلوپی افزایش می‌یابد و کمی پس از آن با افزایش کرنش تا نقطه شکست روند کاهشی دارد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از همکاری مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب دانشگاه تهران قدردانی می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان گواهی می‌کنند که در نگارش این مقاله کلیه اصول اخلاق در مهندسی رعایت شده است.

تعارض منافع: نویسندگان گواهی می‌کنند که در نگارش این مقاله هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارد.

سهم نویسندگان: داود رحمت‌آبادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ علی شاه‌میرزالی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ محمدرضا فراهانی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ رامین هاشمی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)

منابع مالی: هزینه‌های این پروژه به صورت شخصی تامین شده است.

۷- پی‌نوشت

علامت	
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_i^*	میدان جاب‌جایی مجازی (mm)
v_0	جاب‌جایی در جهت y (mm)
V	حجم ابتدایی (mm^3)
w	عرض نمونه (mm)
علامت 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

- properties identification of sheet metals by 2D-digital image correlation method. *Procedia Engineering*. 2017;184:381-389.
- 29- Peters WH, Ranson WF. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*. 1982;21(3):213427.
- 30- Liu S, Chao YJ. Determination of global mechanical response of friction stir welded plates using local constitutive properties. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2004;13(1):1-8.
- 31- Feistauer EE, Bergmann LA, Barreto LS, Dos Santos JF. Mechanical behaviour of dissimilar friction stir welded tailor welded blanks in Al-Mg alloys for marine applications. *Materials and Design*. 2014;59:323-332.
- 32- Foehring D, Chew HB, Lambros J. Characterizing the tensile behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V using multiscale digital image correlation. *Materials Science and Engineering A*. 2018;724:536-546.
- 33- Sánchez-Arévalo FM, Pulos G. Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials. *Materials Characterization*. 2008;59(11):1572-1579.
- 34- Orell O, Vuorinen J, Jokinen J, Kettunen H, Hytönen P, Turunen J, et al. Characterization of elastic constants of anisotropic composites in compression using digital image correlation. *Composite Structures*. 2018;185:176-185.
- 35- Saranath KM, 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*. 2015;68:222-234.
- 36- Rahmatabadi D, Tayyebi M, Hashemi R, Faraji Gh. Microstructure and mechanical properties of Al/Cu/Mg laminated composite sheets produced by the ARB process. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. 2018;25(5):564-572.
- 37- Rahmatabadi D, Hashemi R, Mohammadi B, Shojaei 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*. 2017;708:301-310.
- 38- Rahmatabadi D, 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;108(12):1036-1044.
- 39- Rahmatabadi D, Tayyebi M, Hashemi R, Eghbali B. Investigation of mechanical properties and microstructure for Al/Cu/SiC composite produced by Cross Accumulative Roll Bonding process. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(7):180-184. [Persian]
- strips. *Materials and Design*. 2008;29(4):909-913.
- 16- Jamaati R, Toroghinejad MR. Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527(9):2320-2326.
- 17- Danesh Manesh H, Karimi Taheri A. The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet. *Materials and Design*. 2003;24(8):617-622.
- 18- Movahedi M, Madaah-Hosseini HR, Kokabi AH. The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets. *Materials Science and Engineering A*. 2008;487(1-2):417-423.
- 19- Lu C, Tieu K, Wexler D. Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(10):4830-4834.
- 20- Alizadeh M, Paydar MH. Study on the effect of presence of TiH₂ particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips. *Materials and Design*. 2009;30(1):82-86.
- 21- Jamaati R, Toroghinejad MR. Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process. *Materials and Design*. 2010;31(9):4508-4513.
- 22- Tsuji N, Saito Y, Utsunomiya H, Tanigawa S. Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*. 1999;40(7):795-800.
- 23- Shaarbaf M, Toroghinejad MR. Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process. *Materials Science and Engineering A*. 2008;473(1-2):28-33.
- 24- Eizadjou M, Kazemi Talachi A, Danesh Manesh H, Shakur Shahabi H, Janghorban K. Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process. *Composites Science and Technology*. 2008;68(9):2003-2009.
- 25- Yang D, Cizek P, Hodgson P, Wen C. Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding. *Scripta Materialia*. 2010;62(5):321-324.
- 26- Wu K, Chang H, Maawad E, Gan WM, Brokmeier HG, Zheng MY. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB). *Materials Science and Engineering A*. 2010;527(13-14):3073-3078.
- 27- Naseri M, Reihanian M, Borhani E. Bonding behavior during cold roll-cladding of tri-layered Al/brass/Al composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;24(Part 1):125-137.
- 28- Nguyen VT, Kwon SJ, Kwon OH, Kim YS. Mechanical