



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

The Analysis of Fracture Phenomenon of the Deformed Aluminum- Copper Bimetallic Sheet in the Single Point Incremental Forming

Research Article

Ali Zahedi¹ , Zahra Sadat Amini², Seyed Mohammad Arab³

 [10.22067/jacsm.2025.95791.1365](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.95791.1365)

Abstract: In this study, the fracture behavior of aluminum-copper bimetallic sheet during single-point incremental forming process has been analyzed during experimental tests. For this purpose, the bimetallic sheet was produced by explosive welding method and then deformed during incremental forming process. To provide a basis for comparison with the uniaxial stress condition, uniaxial tensile tests were also conducted on the bimetallic sheets. Microstructural examinations of the fracture zones in both conditions were carried out using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The tensile test results indicated that the fracture strength of the bimetallic specimen increased by 70% compared to the monolithic aluminum sheet, reaching 317 MPa, while elongation improved from 8.5% to 7.5%, suggesting higher toughness in the bimetallic sample. Moreover, fracture surface observations revealed that aluminum exhibited brittle behavior, whereas copper showed ductile fracture under both incremental forming and uniaxial tensile loading. The interfacial microstructure contained intermetallic compounds, and energy-dispersive spectroscopy (EDS) confirmed hardness increase within the bonding region.

KeyWords: Bimetallic Sheet, Fracture Surface, Microstructure, SEM.

1- Introduction

The single-point incremental forming (SPIF) process is a modern, low-cost, and flexible technique for producing thin metallic components, in which a simple forming tool controlled by a CNC machine incrementally forms the sheet through localized deformation [1]. The advantages of SPIF include the elimination of expensive dies, geometric flexibility, numerical control, and the ability to manufacture customized parts. Its applications are rapidly expanding in medical (prosthesis manufacturing), automotive, aerospace, and food industries.

However, analyzing the deformation and fracture behavior in SPIF, especially for bimetallic sheets, is complex. Plastic deformation causes grain refinement,

increases dislocation density, and induces the formation of intermetallic compounds at the interface, which in turn affect mechanical behavior and fracture mechanisms [2].

Aluminum-copper (Al/Cu) bimetallic sheets are widely used in heat exchangers, automotive radiators, and corrosive pipelines due to their combination of low weight, high electrical and thermal conductivity, and good corrosion resistance. Several studies have investigated their behavior under SPIF conditions. Alaie et al. [3] analyzed the influence of forming temperature and reported that increasing temperature up to 250 °C improves formability, whereas higher temperatures lead to brittle intermetallic formation and premature fracture. Tayebi et al. [4] observed that increasing the copper layer thickness reduces the forming limit angle. Zahedi et al. [5] simulated fracture initiation in SPIF using coupled damage-plasticity models.

Despite these studies, experimental analysis of fracture surfaces, intermetallic compounds, and their effect on mechanical performance in Al/Cu bimetallic sheets remains limited. This study aims to investigate the fracture mechanism of explosively welded Al/Cu sheets during SPIF and to examine their microstructure and mechanical behavior up to fracture.

2- Methodology

The Al/Cu bimetallic sheet was fabricated by explosive welding using AA1050 aluminum and C11000 copper plates. The total sheet thickness was 1.15 mm, consisting of a 0.70 mm aluminum layer and a 0.45 mm copper layer. The chemical composition was determined by quantitative analysis: the aluminum layer contained 0.335 wt% Fe and 0.167 wt% Si (≈ 99.35 wt% Al), while the copper layer had ≈ 99.97 wt% Cu with traces of Ni, Fe, and Zn.

The SPIF process was conducted using a hemispherical-ended steel tool (diameter = 10 mm) at a

* Manuscript received October 05, 2025, Revised October 25, 2025, Accepted November 12, 2025.

¹ Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Materials and Manufacturing, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, E-mail: azahedi@uma.ac.ir

² Bachelor of Science, Department of Materials and Manufacturing, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

³ Associate Professor, Department of Materials and Manufacturing, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

feed rate of 200 mm/min. The 100×100 mm sheets were clamped and incrementally formed under CNC control along a conical path with a variable wall angle. The process continued until complete fracture occurred at a depth of 18.63 mm. The deformed geometry and fracture surfaces were preserved for subsequent analysis.

Uniaxial tensile tests were performed according to ASTM E08-04 on wire-cut samples using a SANTAM testing machine. Two types of specimens—monolithic aluminum and Al/Cu bimetal—were evaluated. The mechanical responses are presented in Fig. 1.

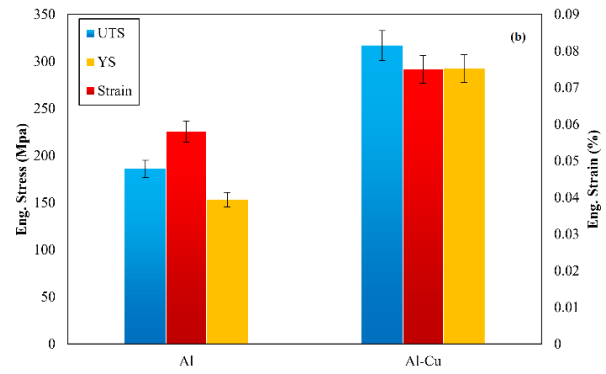
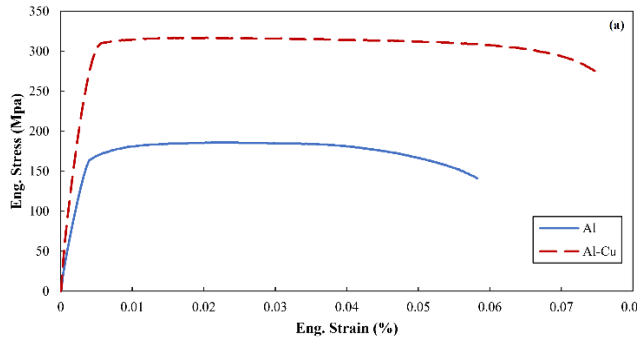


Fig. 1 (a) The Stress-Strain Curves, (b) The extracted mechanical properties.

3- Results and Discussion

Fracture morphology was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) in both backscattered (BSE) and secondary electron (SE) modes. The aluminum layer exhibited ductile fracture with deep dimples, while in the bimetal, as shown in Fig. 2 and Fig. 3, the aluminum side showed brittle cleavage and the copper side ductile dimple-type failure.

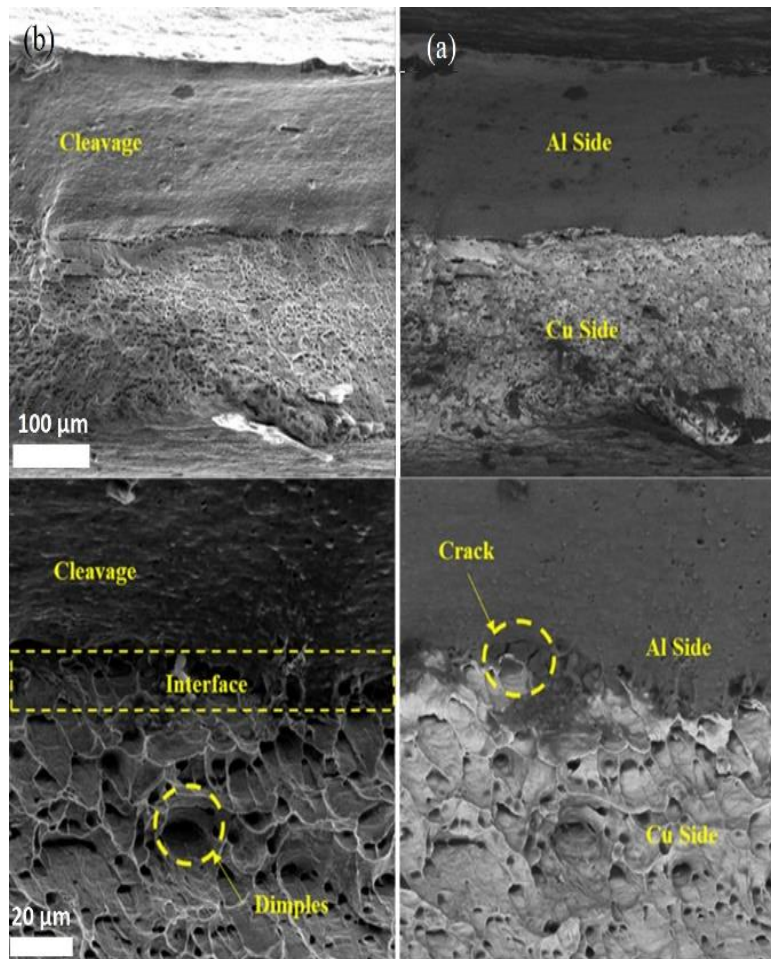


Fig. 2 Fracture surface of Al/Cu bimetallic sheet after uniaxial tensile test at two different magnifications, (a) SEM image with backscattered electrons, and (b) SEM image with secondary electrons.

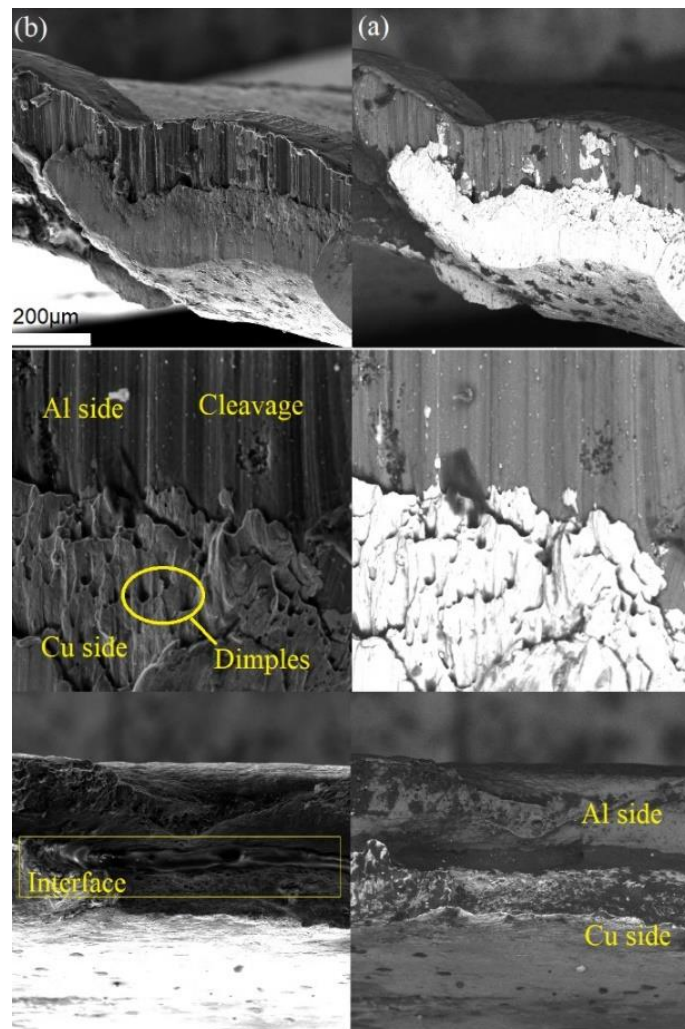


Fig. 3. Fracture microstructure of Al/Cu bimetallic sample after incremental deformation process. (a) SEM image with backscattered electrons and (b) SEM image with secondary electrons.

To identify interfacial compounds, point EDS analysis was performed on dark regions observed in the cross-section area. As presented in Fig. 4, the results indicated the formation of CuAl and Cu $\square$ Al $\square$ intermetallic phases, which contributed to the increased strength and hardness of the interface [6]. A small amount of carbon detected in these regions was attributed to trapped contamination during welding, explosive by-products, or preparation artifacts, but it did not significantly affect the mechanical properties.

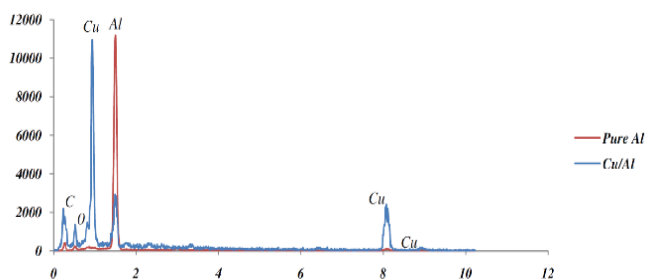


Fig. 4 Results of elemental analysis of the dark area in the cross-section of the Al/Cu sample.

In addition, elemental mapping (X-ray MAP) confirmed a uniform distribution of Al and Cu across the interface, with no evidence of nonmetallic inclusions or secondary phases, indicating a sound and continuous metallurgical bond.

4- Conclusion

The mechanical and microstructural analysis of the explosively welded Al/Cu bimetallic sheet demonstrated a high-quality metallurgical bond between the two metals. The intermetallic phases formed at the interface enhanced overall strength. The ultimate tensile strength and yield strength of the bimetal were measured as 317 MPa and 293 MPa, respectively, compared with 186 MPa and 153 MPa for pure aluminum—representing increases of 70 % and 91 %.

However, the total elongation decreased from 7.5 % in monolithic aluminum to 5.8 % in the Al/Cu bimetal, indicating a 22.6 % reduction in ductility. This decline was attributed to the presence of brittle intermetallic layers that limited dislocation motion at the interface. SEM images revealed local cracks related to CuAl and Cu $\square$ Al $\square$ phases, while EDS and MAP analyses confirmed their

discontinuous distribution, increasing interfacial hardness without severely reducing overall strength. The brittle fracture of aluminum and ductile fracture of copper was consistent with their microstructural characteristics and the strain distribution during forming.

Acknowledgment

This research was supported by the University of Mohaghegh Ardabili (Research grant number 1404/39/7004).

References

- [1] G. Vignesh et al., "Review on incremental sheetmetal forming process: deformation mechanisms and recent developments," *International Journal of Material Forming*, vol. 18, no. 2, p. 30, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12289-025-01895-7>
- [2] J. R. Duflou et al., "Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 253–256, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2008.03.030>
- [3] A. Alaie et al., "Investigation of forming limit diagram and mechanical properties of the bimetallic Al/Cu composite sheet at different temperatures which fabricated by explosive welding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, no. 1–2, pp. 73–84, 2021. <https://doi.org/10.1177/0954405420949227>
- [4] P. Tayebi et al., "Experimental and Numerical Investigation of Forming Limit Diagrams during Single Point Incremental Forming for Al/Cu Bimetallic Sheets," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 2, p. 214, 2024. <https://doi.org/10.3390/met14020214>
- [5] A. Zahedi Dizajyekan et al., "Fracture investigation in single point incremental forming of the Al/Cu laminated sheets using coupled damage plasticity model," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 43, pp. 242–259, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.04.010>
- [6] M. H. M. Kouters et al., "Characterization of intermetallic compounds in Cu–Al ball bonds: Mechanical properties, interface delamination and thermal conductivity," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 8, pp. 1068–1075, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.02.020>



تحلیل پدیده شکست ورق دولایه آلومینیوم - مس تغییر شکل یافته در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای*

مقاله پژوهشی

سید محمد عرب^(۳)زهرا سادات امینی^(۲)علی زاهدی^(۱) 

doi 10.22067/jacsm.2025.95791.1365

چکیده در این پژوهش رفتار شکست ورق دولایه آلومینیوم - مس طی فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای در طی آزمون‌های تجربی تحلیل شده است. برای این منظور ورق دولایه با روش جوشکاری انفجاری تولید شده و سپس طی فرایند شکل دهی تدریجی تغییر شکل داده شده است. به منظور مقایسه با وضعیت تنش تک محوری، آزمون کشش تک محوری نیز بر روی ورق‌های دولایه صورت گرفت. بررسی‌های ریزساختاری با OM و SEM بر روی مقاطع شکست در دو وضعیت انجام گردید. نتایج آزمون‌های کشش نشان داد که استحکام شکست نمونه دولایه با افزایش ۷۰٪ نسبت به ورق آلومینیوم تک لایه به ۳۱۷ مگاپاسکال رسیده و ازدیاد طول نیز از ۵/۸٪ به ۷/۵٪ افزایش یافته است که بیانگر چقرمگی بالاتر نمونه دولایه است. همچنین، بررسی سطح شکست نشان داد که در پدیده شکست در فرایند شکل دهی تدریجی و کشش تک محوری، آلومینیوم رفتار ترد و مس رفتار نرم از خود نشان می‌دهد. ریزساختار فصل مشترک حاوی ترکیبات بین فلزی است و آنالیز EDS افزایش سختی در ناحیه پیوند را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: سطح شکست، ورق دولایه، ریزساختار، SEM.

مقدمه

را به تدریج شکل می‌دهد. با توجه به اینکه فرایند شکل دهی تدریجی بیشتر برای نمونه‌سازی و تولید قطعات در تعداد کم کاربرد دارد، در صنعت اتومبیل‌سازی از این فرایند بیشتر برای ساخت نمونه یا برخی اجزای اتومبیل‌های سفارشی استفاده می‌شود. در صنایع پزشکی از این فرایند برای ساخت پروتزهای پزشکی استفاده می‌شود. این فرایند در صنایع هوافضا و صنایع غذایی نیز کاربردهایی دارد. فرایند شکل دهی تدریجی هم مانند سایر روش‌های شکل دهی دچار ضعف‌هایی است که محققان در سال‌های اخیر آزمایش‌های متعددی در جهت رفع این ضعف‌ها انجام داده‌اند و روش‌های شکل دهی تدریجی متعددی ارائه کرده‌اند [1]. یکی از چالش‌ها در این زمینه بررسی ریزساختار سطح شکست طی این فرایند است که با روش‌های متعددی قابل

شکل دهی تدریجی فرایندی نوین و کم هزینه برای شکل دهی ورق‌های فلزی محسوب می‌شود. با توجه به زمان‌بر بودن این فرایند، استفاده از این روش برای تولید قطعات نسبتاً پیچیده و در تعداد کم توصیه شده است. از مزایای شکل دهی تدریجی ورق می‌توان به در دسترس بودن و قیمت نسبتاً پایین تجهیزات، امکان تولید قطعات در تعداد کم و انعطاف پذیری تولید از لحاظ شکل هندسی، قابلیت کنترل عددی فرایند و عدم نیاز به قالب‌های گران قیمت و پیچیده اشاره کرد. در این فناوری یک ابزار ساده شکل دهی تحت کنترل یک دستگاه CNC، بر روی یک ورق که توسط ورق گیر مناسب مهار شده است، در یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت می‌کند و در اثر ایجاد کرنش‌های برشی ورق

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۷/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مواد، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. Email: azahedi@uma.ac.ir

(۲) کارشناسی مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مواد، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

انجام است. بررسی ریزساختار تغییر یافته در فرایندهای شکل دهی ورق نقش کلیدی در درک مکانیزم های تغییر شکل و شکست مواد دارد. طی فرایند شکل دهی، نه تنها شکل دانه ها به طور قابل توجهی تغییر می کند، بلکه ناهمگایی های داخلی و مرز دانه ها نیز دستخوش تغییرات عمده می شوند. این تغییرات، به ویژه در بخش های بحرانی مانند دیواره های استوانه ای، گوشه های قالب و مناطق فلنج، تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی و نحوه شکست ورق های فلزی دارند. ویژگی های ریزساختاری از جمله اندازه دانه، توزیع فازها و چگالی ناهمگایی ها به ارزیابی رفتار مواد تحت نیروهای مختلف و پیش بینی عملکرد ماده کمک می کنند. تغییر اندازه و شکل دانه در حین شکل دهی، می تواند بهبود استحکام و شکل پذیری را در پی داشته باشد [2]. همچنین، کرنش سختی که ناشی از تغییر شکل پلاستیک است، منجر به افزایش تراکم ناهمگایی ها می شود و در نهایت سختی و استحکام ماده را بالا می برد، اما ممکن است شکل پذیری آن را کاهش دهد. دمای فرایند شکل دهی فلز نیز نقش مهمی در تغییرات ریزساختاری دارد؛ کار سرد معمولاً باعث افزایش تراکم ناهمگایی ها و سختی بیشتر می شود، در حالی که کار داغ می تواند با فعال کردن فرایند تبلور مجدد، چگالی ناهمگایی ها را کاهش دهد. علاوه بر دما، جهت گیری دانه ها (بافت یا تکسچر) نیز بر رفتار ماده تأثیرگذار است. به عنوان مثال، برخی جهت گیری ها می توانند باعث افزایش شکل پذیری یا تشدید عیوبی نظیر گوش دار شدن در کشش عمیق شوند. بررسی این موارد در حالتی که ورق دولایه در فرایند شکل دهی تدریجی مورد استفاده باشد، پیچیده تر می شود و نیاز به بررسی و مطالعه بیشتر پیدا می کند. ورق های دولایه با داشتن خواص ترکیبی از جنس های مختلف کاربردهای خاص و ویژه ای در صنایع مختلف دارند. با انتخاب زوج مناسب، این ورق ها، ترکیبی از خواص مطلوب مانند وزن کمتر، مقاومت خوب در برابر خوردگی، استحکام مکانیکی بالا و هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب را به دست می دهند. برای مثال از ورق دو لایه آلومینیوم - مس در صنایع غذایی برای ساخت محفظه هایی با قابلیت انتقال حرارت و یا جریان الکتریکی استفاده می شود. همچنین به کمک فرایند هیدروفرمینگ، در صنایع هوایی از لوله های دولایه آلومینیوم - مس برای انتقال مواد خورنده استفاده می شود [3]. از طرفی دیگر، این ورق ها در ساخت اجزای مختلف خودرو مانند مبدل های حرارتی و پره های

رادیاتور به کار می روند. رسانایی حرارتی عالی آن ها، انتقال حرارت کارآمد و تنظیم دما را تضمین می کند و به عملکرد کلی و طول عمر خودرو کمک می کند. در نهایت، مطالعه دقیق ریزساختار در فرایندهای شکل دهی تدریجی، امکان بهینه سازی این روش و استفاده در کاربردهای متنوع را فراهم می کند. درک مکانیزم های شکست، پدیده های مرتبط با تنش های پسماند و تأثیرات ترکیبات بین فلزی از جمله مواردی هستند که برای بهبود عملکرد و افزایش قابلیت اطمینان قطعات شکل گرفته، باید به طور دقیق بررسی شوند.

در زمینه بررسی تغییر شکل ورق های دولایه در فرایند شکل دهی تدریجی، هنریش و همکاران [4] اثر قطر ابزار، چینش لایه های فلزی و مسیر ابزار را بر روی نیروی شکل دهی و توزیع ضخامت ورق دولایه Al/Cu مطالعه کردند. نتایج نشان داد که چینش لایه های فلزی اثر زیادی بر نیروهای شکل دهی دارد و مسیرهای مارپیچی باعث توزیع یکنواخت تر ضخامت می شوند. زاهدی [5] به صورت عددی نشان داد که تنش و کرنش اعمالی به ورق دارای مسیری غیرخطی و پیچیده در فرایند شکل دهی تدریجی هستند و پیش بینی شکست ورق نیازمند کالیبره کردن دقیق ثابت های ماده است. قیصریان و همکاران [6] تحقیقی بر روی بهینه سازی پارامترهای شکل دهی تدریجی ورق های دولایه Al/Cu انجام دادند. آزمایش ها نشان داد که نحوه چینش لایه ها، مسیر ابزار و اندازه گام عمودی اثر قابل توجهی بر نیروهای شکل دهی دارد. علایی و همکاران [7] اثر دما بر شکل پذیری و یکپارچگی ورق های دولایه Al/Cu را بررسی کرده اند. ایشان با شکل دهی در دماهای بالاتر (200-250 °C) شکل پذیری را بهبود داده اند، اما در دمای بالاتر از 250 °C ترکیبات شکننده بین فلزی تشکیل شده و شکست زودرس رخ داده است. طیبی و همکاران [8] رفتار مکانیکی و منحنی های حد شکل پذیری ورق های دولایه Al/Cu تولید شده به روش جوشکاری انفجاری را در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی و عددی آن ها نشان داد که توزیع کرنش در دو لایه متفاوت است و لایه آلومینیومی بخش عمده تغییر شکل پلاستیک را تحمل می کند. همچنین مشاهده شد که با افزایش ضخامت نسبی لایه مسی، زاویه حد شکل پذیری کاهش می یابد و محل شروع شکست از دیواره میانی به ناحیه فلنج منتقل می شود. یافته های این پژوهش تأکید دارد که کنترل ضخامت لایه ها و

تدریجی تک نقطه‌ای تغییر شکل تا لحظه بروز پارگی و شکست داده است. نوآوری اصلی این تحقیق، تحلیل مکانیزم شکست ورق دولایه تولید شده به روش جوشکاری انفجاری در فرایند شکل‌دهی تدریجی است که تا کنون به صورت تجربی و مقایسه‌ای با ورق تک‌لایه آلومینیوم گزارش نشده است. برای این منظور مطالعاتی با استفاده از آزمون‌های متالورژیکی بر روی نمونه‌های حاصل از فرایند تغییر شکل تدریجی انجام شده است و نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی دقیق اثر لایه مس بر خواص مکانیکی و رفتار شکست آلومینیوم، نتایج به دست آمده با ورق تک‌لایه آلومینیومی به عنوان نمونه مرجع مقایسه گردید. این مقایسه امکان تحلیل سهم هر یک از لایه‌ها در استحکام و شکل‌پذیری نهایی ورق دولایه را فراهم می‌سازد.

روش پژوهش

برای ساخت ورق دولایه از فرایند جوشکاری انفجاری استفاده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده ورق دولایه، آلیاژهای آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس ۱۰۱۰۰ هستند و ضخامت نهایی ورق به دست آمده ۱/۱۵ mm است که از این ضخامت ۰/۷ mm مربوط به لایه آلومینیومی و ۰/۴۵ mm لایه مسی است. همچنین با استفاده از آزمون کوانتومتری، ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیوم و مس به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) به دست آمد.

با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، ورق دولایه با ابعاد ۱۰۰ mm در ۱۰۰ mm به هندسه مخروطی با زاویه دیواره متغیر، تغییر شکل داده می‌شود. هندسه در نظر گرفته شده برای تغییر شکل به گونه‌ای است که با افزایش عمق شکل‌دهی، اندازه کرنش‌های پلاستیک بیشتری به ورق وارد می‌شود. به منظور بررسی سطح شکست ورق، فرایند تا لحظه وقوع شکست و پارگی ادامه می‌یابد و بلافاصله پس از شکست متوقف می‌شود. هندسه‌ای که ورق طبق آن تغییر شکل یافته، در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. البته با توجه به شکل‌پذیری این ورق، شکست قبل از رسیدن به ارتفاع نهایی و در ارتفاع ۱۸/۶۳ mm رخ می‌دهد. در این فرایند شکل‌دهی تدریجی با سرعت ۲۰۰ mm/min ابزار سر نیم‌کروی انجام گرفت. همچنین جزئیات بیشتر از انجام آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی در مرجع

پارامترهای فرایند، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود رفتار شکل‌دهی ورق‌های دولایه دارد. درویشی و همکاران [9] اثر فرایند نورد زاویه‌ای کانالی (ECAR) را بر خواص مکانیکی ورق‌های دولایه Al/Cu از دیدگاه آزمایشی و عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که عملیات ECAR باعث بهبود استحکام کششی و سختی ناحیه بین‌فلزی شده، اما در عین حال تردی فصل مشترک را افزایش داده است. تصاویر میکروسکوپی نیز حاکی از ریز شدن دانه‌ها و تشکیل فازهای بین‌فلزی CuAl و Al_4Cu_9 در ناحیه اتصال بود. پژوهش آنان نشان داد که تغییرات ریزساختاری ناشی از این فرایند می‌تواند بر رفتار شکست در آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی تأثیرگذار باشد. کاروالهو و همکاران [10] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری انفجاری را برای اتصال ورق‌های Al/Cu با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. جوشکاری اصطکاکی باعث تغییرات گسترده در ریزساختار شده اما جوشکاری انفجاری اتصال مکانیکی محکم‌تر و استحکام بالاتر ایجاد کرده است. کاروالهو و همکاران [11] همچنین ضمن بررسی جوشکاری انفجاری ورق‌های دولایه Al/Cu دریافتند که نحوه چینش لایه‌ها و نوع مواد منفجره تأثیر زیادی بر کیفیت اتصال دارد. نتایج نشان داد که وقتی آلومینیوم به عنوان صفحه پرواز قرار گیرد، ذوب سطحی یکنواختی ایجاد می‌شود، اما استفاده از مس به عنوان لایه بالایی، جوش‌پذیری بین آلومینیوم و مس را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در ادامه هانلیانگ و همکاران [12] به بررسی مورفولوژی ریزساختار ورق دولایه Al/Cu پرداختند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که در فصل مشترک، ترکیبات بین‌فلزی شکنده Al_2Cu و Al_4Cu_9 تشکیل شده‌اند که باعث افزایش سختی و کاهش شکل‌پذیری شده‌اند. زاهدی و همکاران [13]، [14] لحظه شروع شکست در شکل‌دهی تدریجی ورق دولایه Al/Cu را مورد ارزیابی عددی و تجربی قرار دادند. ایشان پدیده ناپایداری و شکست ورق دولایه را از نگاه ماکروسکوپی بررسی کردند و با استفاده از یک معیار آسیب به پیش‌بینی لحظه شروع شکست پرداختند.

با توجه به پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود که بررسی‌های محدودی بر روی سطح شکست ورق دولایه Al/Cu انجام شده است و البته این بررسی‌ها اغلب محدود به فرایندهای تولید ورق دولایه می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی رفتار تغییر شکل و شکست ورق دولایه Al/Cu است که در طی فرایند شکل‌دهی

خواص مکانیکی ورق دولایه حاصل از این آزمون نیز بررسی شده است.

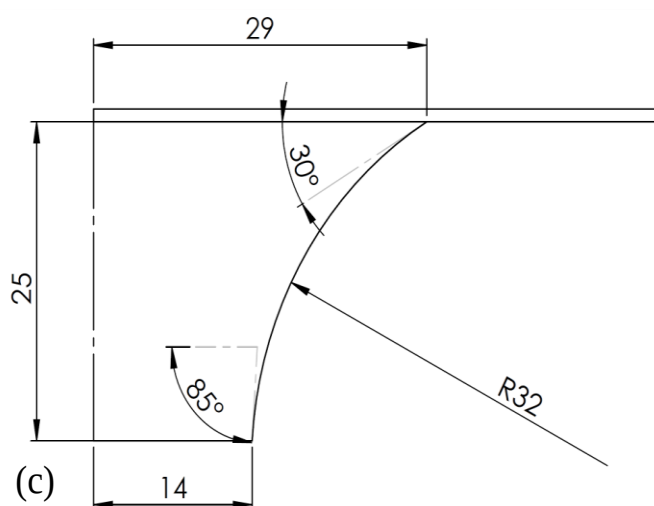
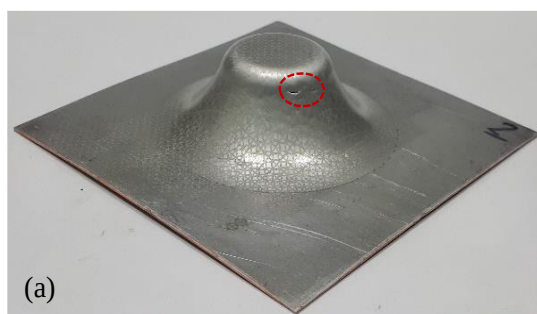
[14] ارائه شده است. شکل (۱- a) و (۱- b) نمونه تغییر شکل داده شده را طی این فرایند نشان می‌دهد. در این پژوهش، سطح شکست ورق دولایه در آزمون کشش یک محوری و

جدول ۱ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لایه آلومینیومی ورق دولایه Al/Cu

Al	Fe	Si	Mn	Sb	Zn	V	Ti
~99.35	0.335	0.167	0.044	0.0332	0.0128	0.0124	0.0094

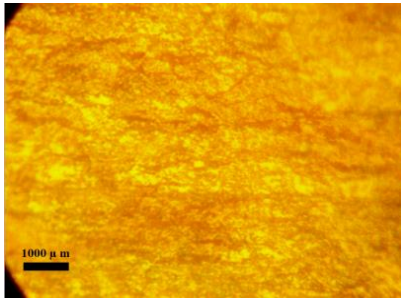
جدول ۲ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لایه مسی ورق دولایه Al/Cu

Cu	Ni	P	Co	Fe	Zn	As	S
~99.97	0.0078	0.005	0.0039	0.002	0.0011	0.001	0.0006



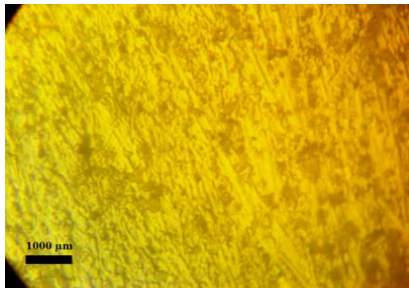
شکل ۱ ورق دولایه تغییر شکل داده شده در فرایند شکل‌دهی تدریجی، (a) سطح بیرونی لایه آلومینیومی، (b) سطح درونی لایه مسی، (c) هندسه مورد نظر جهت تغییر شکل (ابعاد به mm است)

محلول دیگری شامل FeCl_3 و HCl نیز ناکارآمد بود. در نهایت، تصمیم گرفته شد که هر فلز جداگانه اچ شود. اچ کردن مس ابتدا با استفاده از محلول حاوی FeCl_3 و HNO_3 انجام شد که مس تا حدودی اچ شد، اما بهترین نتیجه با محلولی شامل H_2O ، HNO_3 و HF به دست آمد [16] و همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، تا حدودی دانه‌های کشیده شده مس را نشان داد.



شکل ۳ متالوگرافی مس با بزرگ نمایی 100x

در اچ آلومینیوم تلاش برای اچ الکتروشیمیایی [17] موفقیت‌آمیز نبود و بهترین نتیجه با محلول Weck's reagent [18] حاصل شد، که دانه‌بندی آلومینیوم را طبق شکل (۴) تا حدودی نمایان کرد.



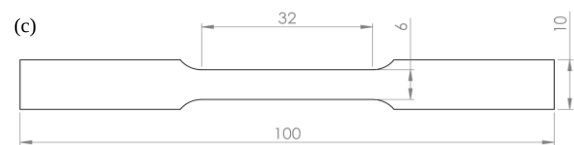
شکل ۴ متالوگرافی آلومینیوم با بزرگ نمایی 100x

پس از اچ کردن، تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که در مس، دانه‌های کشیده شده حاصل از فرایند نورد قابل مشاهده هستند. در آلومینیوم نیز دانه‌های کشیده شده در اثر نورد دیده شدند، اما شناسایی جزئیات دشوار بود. تحلیل متالوگرافی نشان داد که هر دو فلز رفتار متفاوتی در برابر محلول‌های اچ دارند. ساختار دانه‌بندی آن‌ها تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی دارد و برای بررسی دقیق‌تر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM استفاده شد.

آزمون کشش

آزمون کشش تک‌محوری برای تعیین خواص مکانیکی ورق‌های دولایه Al/Cu و ورق پایه آلومینیوم طبق استاندارد ASTM E08-04 انجام شد. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد و با استفاده از وایرکات از ورق دولایه بریده شدند. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش ستنام و با نرخ کرنش اولیه 10^{-3} s^{-1} انجام شد. میانگین نتایج برای هر نوع نمونه به دست آمده (ورق آلومینیوم تک‌لایه و ورق دولایه Al/Cu)، گزارش شد.

نمودارهای تنش - کرنش حاصل از آزمون‌های کشش در قسمت نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از میکروسکوپ استریو برای تصویربرداری از ظاهر سطوح شکست استفاده شده است.



شکل ۲ نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری، (a) نمونه‌های Al/Cu (b) نمونه‌های آلومینیوم، (c) شماتیک نمونه (ابعاد به mm است)

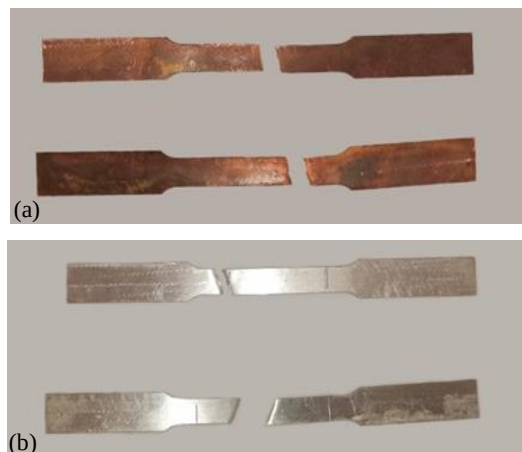
متالوگرافی

در متالوگرافی ورق دولایه Al/Cu ، چالش اصلی، استفاده از محلول اچ مناسب برای هر دو فلز است. در فرایند اچ کردن، چندین محلول اچ مختلف بر اساس توصیه‌های استاندارد ASTM E407-07 آزمایش شد [15]. برای مثال محلول Keller تأثیر زیادی روی آلومینیوم نداشت و مس هیچ تغییری نشان نداد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون کشش

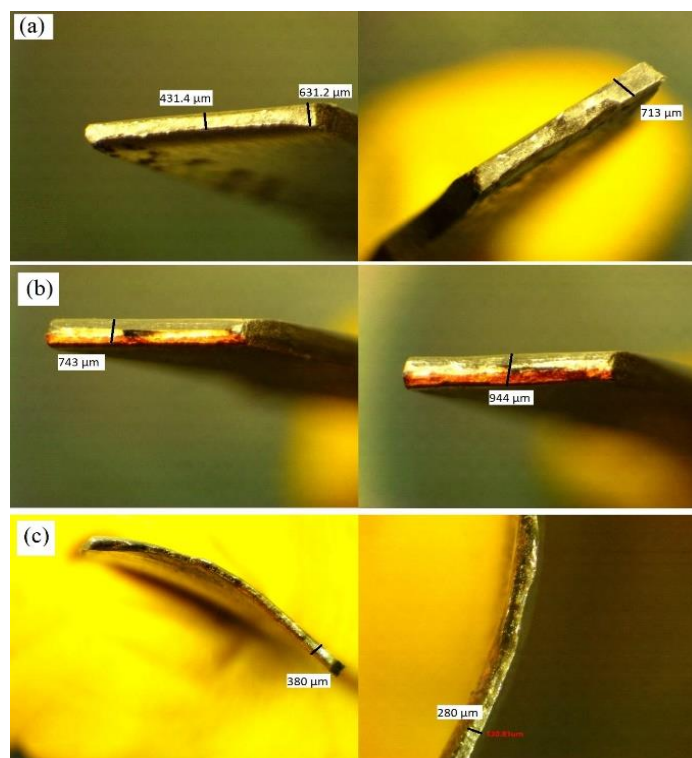
در شکل (۵) نمونه‌های آزمون کشش پس از شکست نشان داده شده است. به نظر می‌رسد در نمونه‌های ورق دولایه Al/Cu شکست نرم و ترد اتفاق افتاده باشد، در حالی که در نمونه تک‌لایه آلومینیومی ظاهر شکست نشان‌دهنده غالب بودن شکست نرم می‌باشد.



شکل ۵ نمونه‌های آزمون کشش بعد از انجام آزمون، (a) ورق Al/Cu، شکست ترد، (b) ورق آلومینیوم، شکست نرم

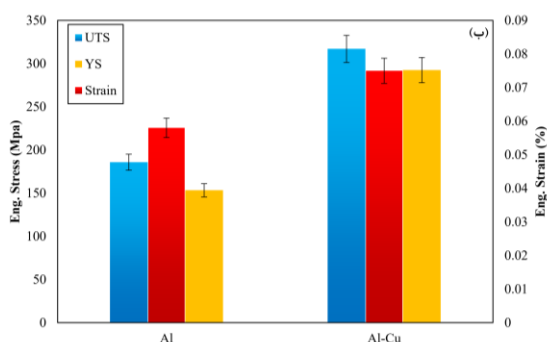
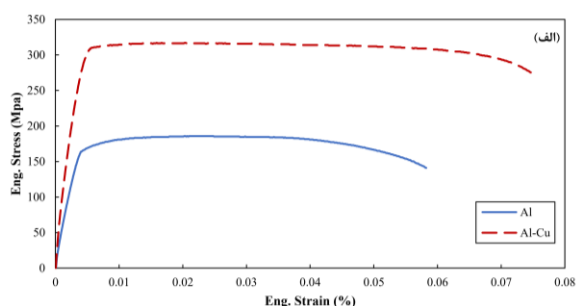
سطح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ استریو تصویربرداری شده است. در سطوح شکست قسمت‌های مات نشان دهنده شکست نرم و قسمت‌های براق نشان دهنده شکست ترد هستند. شکل (۶- a) سطح شکست دو نمونه آزمون کشش تک‌لایه آلومینیومی است. به وضوح دیده می‌شود که مد شکست نرم غالب مد شکست ترد است و نمونه شکست نرمی داشته است. در شکل (۶- b) که مربوط به سطح شکست ورق دولایه Al/Cu است، قسمت‌های براق نسبت به مات بیشتر است که نشان دهنده غالب بودن شکست ترد در این نمونه‌ها است. این موضوع را می‌توان به انعطاف‌پذیری آلومینیوم به مس نسبت داد. همچنین عیوب و یا فازهای ثانویه ایجاد شده هنگام اتصال این ورق‌ها نیز می‌تواند منجر به این موضوع گردد.

شکل (۶- c) مربوط به سطح شکست نمونه حین شکل‌دهی تدریجی (شکل ۱) است. در سطح شکست این نمونه، قسمت نشان داده شده دچار تغییرات زیادی شده است و این تغییرات می‌تواند حاصل کرنش پلاستیک شدید هنگام شکل‌دهی و اتصال این دو ورق باشند.



شکل ۶ تصویر میکروسکوپ استریو از سطح شکست (a) آلومینیوم (آزمون کشش)، (b) Al/Cu (آزمون کشش)، (c) Al/Cu (فرایند شکل‌دهی تدریجی)

همین ناحیه فصل مشترک در ورق‌های دولایه می‌باشد. عامل بعدی که می‌تواند بر میزان کرنش شکست نمونه‌های دولایه تأثیرگذار باشد، ضخامت است. طالبی و همکاران [21] نشان دادند که ضخامت نقش مهمی در شروع و رشد آسیب در فرایندهای شکل‌دهی ورق دارد. از طرفی، بر اساس گزارش‌های ارائه شده [20] مشخص شده است که میزان کرنش شکست در نمونه‌های ضخیم‌تر نسبت به نمونه‌های نازک‌تر بیشتر است. بنابراین، ازدیاد طول ورق با افزایش ضخامت نمونه افزایش می‌یابد. در ورق دولایه مورد بررسی در این پژوهش نیز ضخامت ورق دولایه از ورق تک‌لایه آلومینیومی 0.15mm بیشتر است و بخشی از افزایش کرنش شکست آن را می‌توان به این فاکتور نسبت داد.



شکل ۷ (a) منحنی‌های تنش - کرنش، (b) خواص مکانیکی استخراج شده

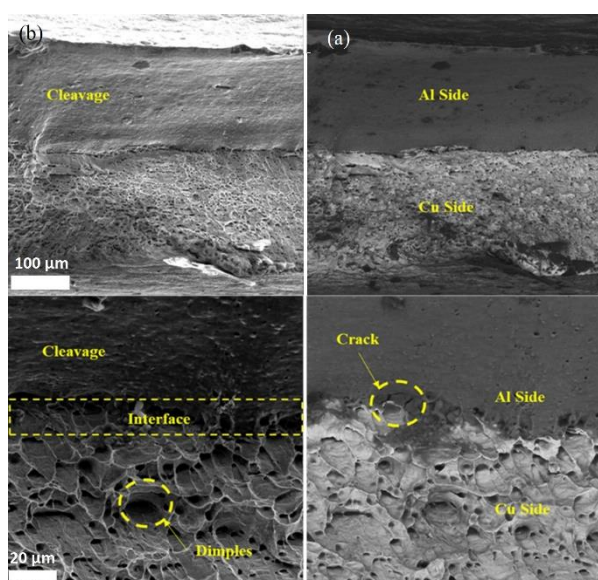
تحلیل نتایج SEM

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از تصاویر SEM پرداخته می‌شود. انواع مختلفی از شکست در فلزات رخ می‌دهد که نوع شکست می‌تواند وابسته به ماده، دما، حالت تنش و نرخ کرنش باشد. به منظور ارزیابی رفتار شکست، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تصویربرداری از سطح شکست نمونه‌ها پس از فرایند شکل‌دهی تدریجی و آزمون کشش

نتایج آزمون کشش در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل مشاهده می‌شود که رفتار مکانیکی نمونه Al/Cu نسبت به نمونه Al کاملاً متفاوت بوده و رفتار کششی آلومینیوم پس از اتصال با مس به صورت کامل تغییر پیدا کرده است. نتایج کمی آزمون کشش در شکل (۷ - b) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که خواص مکانیکی نمونه Al/Cu (استحکام شکست، استحکام تسلیم و ازدیاد طول) نسبت به نمونه Al افزایش پیدا کرده است. افزایش چشم‌گیر سطح زیر منحنی تنش - کرنش در نمونه Al/Cu که نشان دهنده چقرمگی ایستایی ماده است، می‌تواند باعث افزایش مقاومت ماده در برابر اشاعه ترک شود. بهبود خواص ورق‌های دولایه Al/Cu نسبت به ورق‌های Al یکی از اهداف تولید ورق‌های دولایه یا چند لایه با مواد مختلف بوده است و بالا بودن استحکام شکست و شکل‌پذیری (درصد ازدیاد طول) نمونه Al/Cu تولید شده توسط جوشکاری انفجاری در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است. شایان ذکر است که بر اساس مطالعات صورت گرفته، استحکام شکست ورق‌های دولایه Al/Cu عموماً بین استحکام آلومینیوم خالص و مس خالص می‌باشد [19].

خواص مکانیکی ناحیه اتصال یا همان فصل مشترک آلومینیوم و مس می‌تواند بر رفتار کششی و به خصوص ازدیاد طول (کرنش شکست) نمونه‌های دولایه تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در سایر پژوهش‌ها [20] مشاهده شده است که سختی ناحیه پیوند بیشتر از نواحی مجاور است. این افزایش سختی را می‌توان به وقوع واکنش شیمیایی در حین جوشکاری انفجاری و ایجاد فاز متالورژیکی بسیار سخت بین لایه‌های Al و Cu نسبت داد. با توجه به اینکه سختی این ناحیه بیشتر از نواحی مجاور است، بنابراین امکان حرکت نابه‌جایی‌ها در این ناحیه کمتر از سایر نواحی است و عموماً این ناحیه نباید نقش زیادی در ازدیاد طول (کرنش شکست) داشته باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه پیوند نمی‌تواند دلیل مناسبی برای ازدیاد طول ورق دولایه باشد. سختی و استحکام بالاتر فصل مشترک ورق‌های دولایه به دلیل بروز واکنش‌های شیمیایی در حین فرایند تولید برخی ترکیبات بین‌فلزی، منجر به بهبود خواص استحکامی ورق‌های دولایه می‌شود. در نتیجه یکی از دلایل بهبود استحکام شکست و استحکام تسلیم ورق‌های دولایه که در شکل (۷) ارائه شده است،

موضوع می‌تواند به حضور ترکیبات ترد بین‌فلزی در فصل مشترک آلومینیوم و مس مربوط باشد. حضور حفرات و شکست مخروط و فنجان در سمت مس کاملاً مشهود است. این موضوع خود نشان دهنده شکست نرم است. در سطح شکست سمت مس ورق دولایه مشاهده می‌شود که فرایند شکست و جدایش به این صورت اتفاق افتاده است که در ابتدا حفرات با ابعاد کوچک‌تر ظاهر شده‌اند و در ادامه با افزایش تنش اعمالی در حین آزمون کشش، حفرات کوچک ایجاد شده دچار گسیختگی بیشتری شده و به هم پیوسته‌اند که نتیجه این فرایند تولید حفرات با ابعاد بزرگ‌تر و گسیختگی‌های بزرگ‌تر بوده است. در نهایت پس از عبور از استحکام شکست، جدایش و شکست اتفاق افتاده است.

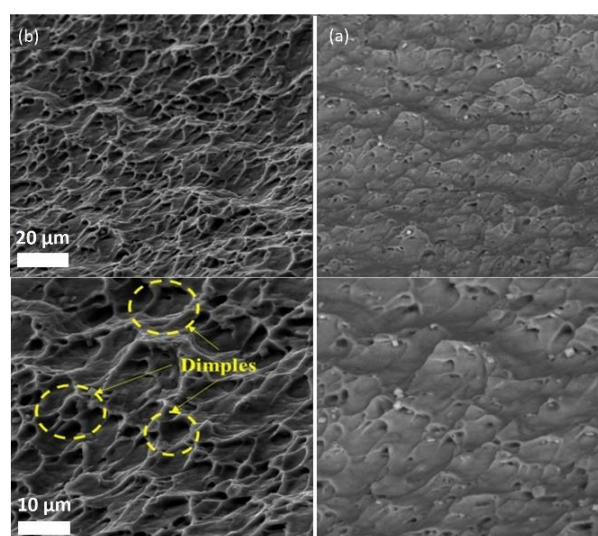


شکل ۹ سطح شکست ورق دولایه Al/Cu پس از آزمون کشش تک محوری در دو بزرگ‌نمایی مختلف: (a) تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و (b) تصویر SEM با الکترون‌های ثانویه

شکل (۱۰) نتایج سطح شکست نمونه دولایه Al/Cu را در فرایند تغییر شکل تدریجی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در این نمونه نیز شکست قسمت آلومینیومی کلیواژ بوده و شکست سمت مسی از نوع شکست نرم می‌باشد. بر اساس گزارش ارائه شده توسط راساد و همکاران [22] با افزایش سرعت تغییر شکل، تنش‌های برشی افزایش پیدا کرده و تولید حفرات و فضای خالی در سطح شکست افزایش پیدا می‌کند. در شکست نرم، حفراتی با رشد در جهت ضخامت تولید

استفاده شد. نتایج این بررسی در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

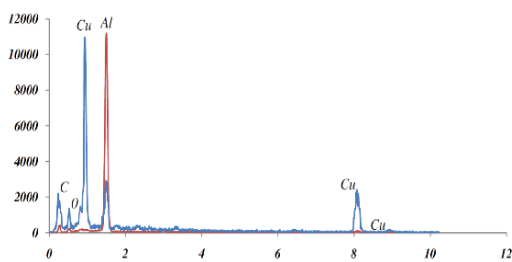
شکل (۸ - a) و (۸ - b) به ترتیب تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و ثانویه سطح شکست نمونه آلومینیومی را پس از آزمون کشش در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. در تصویر (a) الکترون‌های ثانویه عمق میدان جزئیات سطح شکست و در تصویر (b) الکترون‌های برگشتی فازهای ثانویه یا آلودگی‌های احتمالی سطحی نشان داده می‌شود. حالت شکست برای ورق Al با ساختار FCC، شکست نرم با فرورفتگی‌های عمیق و هم‌محور است. حضور حفره‌ها، کشیدگی و تعدد آن‌ها نشان دهنده شکست نرم است.



شکل ۸ سطح شکست ورق آلومینیوم پس از آزمون کشش تک‌محوری در دو بزرگ‌نمایی مختلف: (a) تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و (b) تصویر SEM با الکترون‌های ثانویه

ارزیابی سطح شکست ورق دولایه آلومینیوم و مس که در شکل (۹) ارائه شده است، نشان می‌دهد که حالت شکست غالب ورق دولایه در قسمت آلومینیوم، شکست ترد است. شکست کلیواژ در سمت آلومینیومی نمونه دولایه کاملاً مشهود است. دلیل تغییر مکانیسم شکست از حالت شکست نرم به شکست ترد می‌تواند به وقوع کار سرد و افزایش کرنش اعمال شده و در نتیجه افزایش تراکم ناب‌جایی‌ها باشد. از طرفی در فصل مشترک اتصال ورق مسی و آلومینیومی ترک‌هایی مشاهده می‌شود که این موضوع خود نشان دهنده رفتار ترد فصل مشترک است. این

ناحیه تیره‌رنگ در شکل (۱۱) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که این ناحیه دارای درصد کمی کربن است که این کربن می‌تواند از آلودگی‌های به دام افتاده حین فرایند تولید، محصولات ناشی از انفجار ضمن جوشکاری، آلودگی‌های ناشی از مراحل آماده‌سازی نمونه و همچنین از ترکیبات هیدروکربنی متصاعد شده از سطح مانت تحت خلأ ناشی شده باشد. به هر حال وجود این ترکیب پرکربن موضعی منجر به کاهش خواص مکانیکی نمونه دولایه نشده است (شکل ۷ - a). با توجه به نسبت پیک‌های عناصر در شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت ترکیبات بین‌فلزی CuAl و Cu_9Al_4 در فصل مشترک تشکیل شده‌اند. افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی کامپوزیت دولایه را می‌توان به حضور این ترکیب‌های بین‌فلزی به ویژه Cu_9Al_4 که دارای سختی و استحکام بسیار بالایی است، نسبت داد [23].

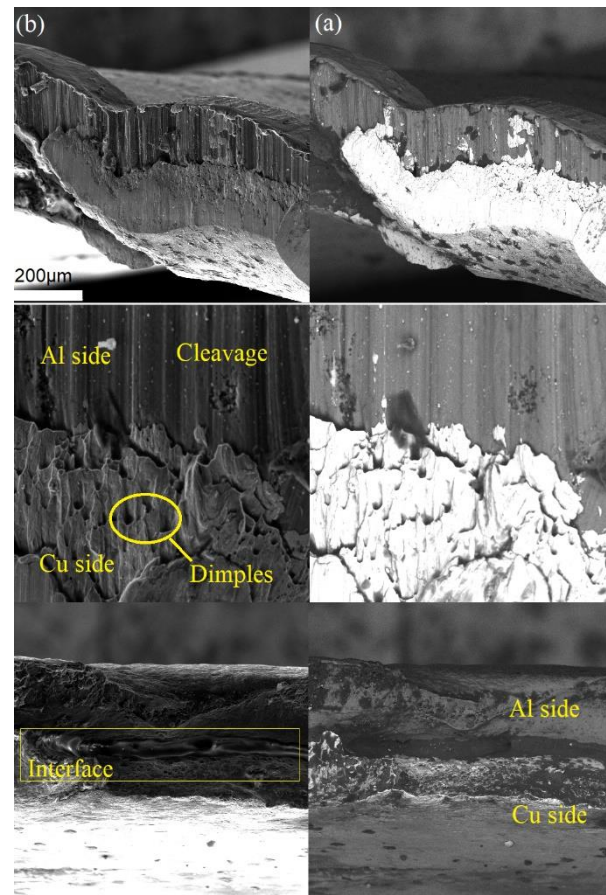


شکل ۱۱ نتایج آنالیز عنصری منطقه تیره‌رنگ در سطح مقطع نمونه Al/Cu

نقشه توزیع عنصری (X-Ray MAP)

به منظور بررسی توزیع عناصر در ناحیه اتصال و هر دو سمت نمونه دولایه از آنالیز عنصری MAP استفاده شده است. نتایج این بررسی در شکل (۱۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این شکل مشاهده می‌شود که در فصل مشترک اتصال دو فلز مس و آلومینیوم به یکدیگر هیچ گونه ناخالصی دیگر مشاهده نشده است که این خود نشان دهنده بهبود اتصال میان این دو فلز است. از طرفی مشاهده می‌شود که درهم‌تنیدگی مکانیکی در حین فرایند تولید در میان دو لایه روی داده و اتصال این دو ورق به صورت مکانیکی اتفاق افتاده است.

شده و تعداد گودی‌های بیشتری در این نوع از شکست تشکیل می‌گردد.



شکل ۱۰ ریزساختار شکست نمونه دولایه Al/Cu پس از فرایند تغییر شکل تدریجی: (a) تصویر SEM با الکترون‌های برگشتی و (b) تصویر SEM با الکترون‌های ثانویه

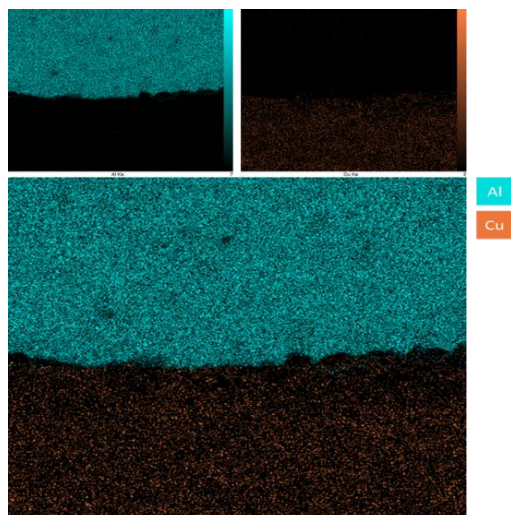
در نقاط محدودی از سطح مقطع شکست در شکل (۱۰)، یک ناحیه تیره‌رنگ نیز مشاهده می‌شود. این ناحیه تیره‌رنگ می‌تواند یک ترکیب بین‌فلزی بین آلومینیوم و مس باشد. حضور چنین ترکیب‌هایی در ریزساختار سطح مقطع ممکن است خواص مکانیکی ناحیه اتصال را تحت تأثیر قرار دهد و در برخی موارد ممکن است منجر به تضعیف خواص مکانیکی شود. اگر این لایه بین‌فلزی به صورت پیوسته باشد، به دلیل تردی این ترکیبات بین‌فلزی ممکن است رشد و اشاعه ترک در فصل مشترک به سرعت صورت بگیرد و در نتیجه مقاومت نمونه در برابر اشاعه ترک کاهش پیدا کند. به منظور شناسایی این ناحیه تیره‌رنگ از آنالیز EDS نقطه‌ای استفاده شد و نتایج آنالیز نقطه‌ای حاصل از

چالش برانگیز بود.

ورق دولایه Al/Cu خواص مکانیکی بهتری نسبت به ورق تک‌لایه دارد. بررسی‌های SEM و آنالیز MAP تأیید کردند که اتصال دارای کیفیت بالایی است، اما مستعد ترک‌خوردگی است. نتایج این پژوهش به بهینه‌سازی فرایند تولید و اتصال فلزات در صنایع مختلف کمک می‌کند و زمینه را برای تحقیقات بیشتر در جهت بهبود خواص مکانیکی این ورق‌ها فراهم می‌سازد.

واژه‌نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
شکست ترد	brittle fracture	واشکنی ترد
شکست کلیواژ	cleavage fracture	واشکنی شکافی
شکست نرم	ductile fracture	واشکنی نرم
گودی	dimple	
تراکم ناب‌جایی	dislocation density	چگالی ناب‌جایی
ازدیاد طول	elongation	ازدیاد طول کشامد
جوشکاری انفجاری	explosive welding	
سطح شکست	fracture surface	سطح واشکنی
کرنش شکست	fracture strain	کرنش واشکنی
استحکام شکست	fracture strength	تاب شکست
شکل‌پذیری	formability	
شکل‌دهی تدریجی	incremental forming	
کرنش پلاستیک	plastic strain	کرنش مومسان
آزمون کوانتومتري	Quantometer Analysis	تحلیل کوانتومتري
استحکام تسلیم	yield strength	تاب تسلیم



شکل ۱۲ نتایج آنالیز عنصری MAP برای نمونه دولایه Al/Cu

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار ورق دولایه Al/Cu تولید شده به روش جوشکاری انفجاری پرداخته است. تحلیل آزمون کشش نشان داد که نمونه دولایه در مقایسه با آلومینیوم خالص، دارای استحکام شکست و استحکام تسلیم بالاتری است، اما به دلیل حضور ترکیبات بین‌فلزی، شکست آن ترد رخ داده است. در مقابل، ورق آلومینیوم شکست نرم را نشان داد. در مقایسه عددی، استحکام شکست ورق دولایه برابر با ۳۱۷MPa و استحکام تسلیم آن ۲۹۳MPa اندازه‌گیری شد؛ در حالی که این مقادیر برای ورق آلومینیوم به ترتیب ۱۸۶MPa و ۱۵۳MPa بود که به ترتیب ۷۰٪ و ۹۱٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین ازدیاد طول کل ورق Al/Cu معادل ۵/۸٪ و برای آلومینیوم برابر با ۷/۵٪ بود که بیانگر کاهش ۲۲/۶٪ در قابلیت تغییر شکل پلاستیک است.

در تصاویر SEM سطح شکست، مشاهده شد که در ناحیه اتصال آلومینیوم و مس، ترک‌هایی وجود دارد که نشان دهنده تأثیر ترکیبات بین‌فلزی بر کاهش شکل‌پذیری نمونه دولایه است. همچنین، بررسی آنالیز عنصری MAP نشان داد که فصل مشترک اتصال فاقد ناخالصی قابل توجهی بوده است که کیفیت اتصال مکانیکی مطلوب را تأیید می‌کند.

آزمون متالوگرافی نشان داد که پیداکردن محلول اچ مناسب برای هر دو فلز دشوار است و اچ جداگانه مورد نیاز است. پس از اچ مناسب، دانه‌های کشیده شده در اثر فرایند نورد در هر دو فلز دیده شدند، اما مشاهده جزئیات ساختاری آلومینیوم

تقدیر و تشکر

پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۴/۵/۹/۷۰۰۴ استخراج گردیده است.

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح

مراجع

- [1] G. Vignesh et al., "Review on incremental sheetmetal forming process: deformation mechanisms and recent developments," *International Journal of Material Forming*, vol. 18, no. 2, p. 30, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12289-025-01895-7>
- [2] J. R. Duflou et al., "Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 253–256, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2008.03.030>
- [3] G. Payganeh et al., "Experimental Study and Simulation of Tube Hydroforming Process of Bi-layered Aluminum-Copper with Axial Feeding," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 2, pp. 65–84, 2017. <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v28i2.48455>
- [4] M. Honarpisheh and A. Gheysarian, "An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal," *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 7, no. 1, pp. 73–83, 2017. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2017.646>
- [5] A. Zahedi Dizajyekan, "Investigation of Fracture Mechanism in Single Point Incremental Forming of AA5052 Aluminum Alloy Using the Bao-Wierzbicki Damage Model," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 4, pp. 63–76, 2023. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81834.1180>
- [6] A. Gheysarian and M. Honarpisheh, "Process Parameters Optimization of the Explosive-Welded Al/Cu Bimetal in the Incremental Sheet Metal Forming Process," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 945–956, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0205-6>
- [7] A. Alaie et al., "Investigation of forming limit diagram and mechanical properties of the bimetallic Al/Cu composite sheet at different temperatures which fabricated by explosive welding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, no. 1–2, pp. 73–84, 2021. <https://doi.org/10.1177/0954405420949227>
- [8] P. Tayebi et al., "Experimental and Numerical Investigation of Forming Limit Diagrams during Single Point Incremental Forming for Al/Cu Bimetallic Sheets," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 2, p. 214, 2024. <https://doi.org/10.3390/met14020214>
- [9] M. Darvishi et al., "Effects of equal channel angular rolling process on the mechanical properties of Al-Cu two-layer sheets: experimental and numerical approaches," *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 3, p. 035023, 2023. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ace6f5>
- [10] G. H. S. F. L. Carvalho et al., "Friction stir welding and explosive welding of aluminum/copper: process analysis," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 11, pp. 1243–1250, 2019. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1644452>

- [11] G. H. S. F. L. Carvalho et al., "Weldability of aluminium-copper in explosive welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 5–8, pp. 3211–3221, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03841-9>
- [12] L. Hanliang et al., "Interface microstructure morphology and formation evolution mechanism of Al-1060/Cu-T2 composites fabricated by explosive welding method," *Compos Interfaces*, vol. 29, no. 5, pp. 465–485, 2022. <https://doi.org/10.1080/09276440.2021.1971883>
- [13] A. Zahedi Dizajyekan et al., "Fracture investigation in single point incremental forming of the Al/Cu laminated sheets using coupled damage plasticity model," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 43, pp. 242–259, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.04.010>
- [14] A. Zahedi Dizaj Yekan et al., "Failure Analysis in Single-Point Incremental Forming of Bilayer Sheet Using the Ductile Fracture Criterion," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1543–1554, 2020.
- [15] E04 Committee, "Practice for Microetching Metals and Alloys," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007. <https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01>
- [16] P. Schmalen et al., "Metallographic Studies of Dissimilar Al-Cu Laser-Welded Joints Using Various Etchants," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 8, no. 1, pp. 3–11, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13632-018-0501-y>
- [17] D. PARK and H. KIM, "Electrochemical Etching of Aluminum through Porous Alumina," *Analytical Sciences/Supplements*, vol. 17asia, pp. a73–a76, 2001. <https://doi.org/10.14891/analscisp.17asia.0.a73.0>
- [18] L. Gao et al., "Microstructural characterization of aluminum alloys using Weck's reagent, part I: Applications," *Mater Charact*, vol. 107, pp. 426–433, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2015.01.005>
- [19] A. Zahedi et al., "Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 153–154, pp. 341–358, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2019.02.002>
- [20] F. a. Marandi et al., "An Experimental, Analytical, and Numerical Investigation of Hydraulic Bulge Test in Two-Layer Al-Cu Sheets," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 139, no. 3, p. 31005, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4034717>
- [21] H. Talebi-Ghadikolaee et al., "Formability Study in Roll Forming Process: Insights into the Influence of Process Parameters on Damage Distribution," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 115–128, 2024. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.84727.1207>
- [22] M. Arun Prasad and C. Sathiya Narayanan, "Experimental analysis on formability of Cupro-Nickel (90/10 Cu-Ni) during single point incremental forming process," *Mater Today Proceeding*, vol. 87, pp. 356–366, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.444>
- [23] M. H. M. Kouters et al., "Characterization of intermetallic compounds in Cu-Al ball bonds: Mechanical properties, interface delamination and thermal conductivity," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 8, pp. 1068–1075, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.02.020>