



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## به دست آوردن تجربی نمودار حد شکل دهی در ورق های دولایه فلزی مس-آلومینیم

احسان کرجی بانی<sup>۱</sup>، رامین هاشمی\*<sup>۲</sup>، محمد صدیقی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی، ۱۶۳-۱۶۷۶۵، rhashemi@iust.ac.ir

### چکیده

امروزه استفاده از ورق های دولایه فلزی راه حلی مناسب برای تولید محصولاتی چند کاربره محسوب می شود. به طور کلی ورق های دولایه فلزی دارای ویژگی هایی از قبیل بهبود شکل پذیری ورق با شکل پذیری کم، افزایش مقاومت در برابر خوردگی و سایش، کاهش وزن و هزینه قطعات تولیدی می باشند. به همین منظور مطالعه میزان شکل پذیری ورق های دولایه فلزی، دارای نقشی اساسی در طراحی عملیات شکل دهی ورق های فلزی می باشد. نمودار حد شکل دهی روشی مناسب برای تعیین قابلیت شکل پذیری ورق های فلزی در فرآیندهای شکل دهی فلزات می باشد. هدف در این کار پژوهشی، انجام آزمایش تجربی برای تعیین نمودار حد شکل دهی ورق های دولایه فلزی بوده است. نمودار حد شکل دهی به عنوان یک معیار برای پیش بینی وقوع حالت گلوبی شدگی که در نهایت منجر به پارگی ورق فلزی می شود به کار گرفته خواهد شد. در تحقیق حاضر، نمودار حد شکل دهی ورق دولایه فلزی آلومینیم-مس برای نخستین بار به صورت تجربی به دست آمده است.

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۵/۷

پذیرش: ۹۴/۸/۴

### کلیدواژگان:

ورق دولایه فلزی  
منحنی حد شکل دهی  
مطالعه تجربی  
شکل پذیری

## Experimental determination of forming limit diagram in Aluminum-Copper two-layer metallic sheets

Ehsan Karajibani, Ramin Hashemi\*, Mohammad Sedighi

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

\*P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

### Keywords

Two-Layer Metallic Sheet  
Forming Limit Diagram  
Experimental Study  
Formability

### Abstract

Nowadays, two-layer metallic sheets have become as a useful solution to produce multi-functional products. Generally, two-layer metallic sheets can have advantageous characteristics such as increasing formability of the low formable component, improving the corrosion and wear resistance and reducing weight and cost of manufactured products. Therefore, understanding the forming limit behavior of a two-layer metallic sheet has an essential role in the design of sheet metal forming processes. Forming limit diagram (FLD) is a suitable method to predict the formability of metallic sheets in sheet metal forming operations. The aim of this research was to determine the forming limit diagram in Aluminum-Copper two-layer metallic sheets experimentally. The forming limit diagram can be used as a criterion in order to predict necking initiation which may cause tearing in sheet metal forming processes. In this paper, the forming limit diagrams of Aluminum-Copper two-layer metallic sheets have been obtained through an experimental procedure for the first time.

### ۱- مقدمه

شکل دهی<sup>۱</sup> می باشد. نمودار حد شکل دهی معیاری برای ارزیابی قابلیت شکل پذیری یک ورق فلزی می باشد [۱]. مقادیر محدودکننده کرنش های اصلی  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  یک ورق فلزی در طی عملیات شکل دهی را می توان با اندازه گیری تغییر شکل موضعی یک قسمت از آن تعیین کرد که در آن گلوبی شدن و یا پارگی رخ می دهد. معمولاً قبل از انجام فرآیند کشش ورق،

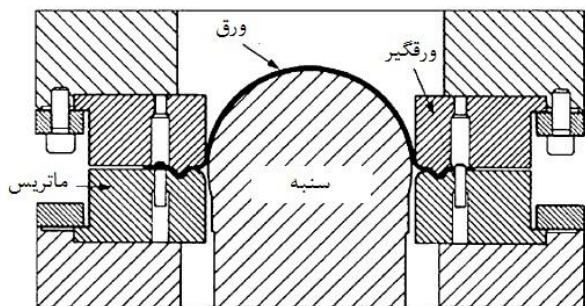
شکل پذیری ورق را می توان توانایی ورق به تغییر شکل و تبدیل شدن به شکل مورد نظر بدون ایجاد پارگی و گلوبی شدن، تعریف نمود. ورق ها را تنها تا حد معینی می توان تغییر شکل داد که این حد با شروع گلوبی شدن موضعی که در نهایت منجر به پارگی می شود مشخص می گردد. یکی از روش های معروف که محدودیت های فوق را نشان می دهد نمودار حد

1. Forming Limit Diagram (FLD)

### Please cite this article using:

Karajibani, E. Hashemi, R. and Sedighi, M., "Experimental determination of forming limit diagram in Aluminum-Copper two-layer metallic sheets", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 45-50, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:



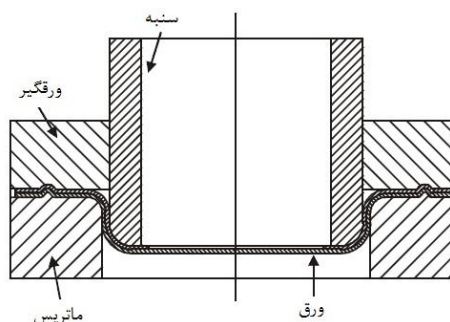
شکل ۲ شمای کلی از آزمون خارج از صفحه‌ی ناکازیم

شروع کار بر روی ورق‌های دولایه ابتدا در سال ۱۹۷۹ توسط سمیاتین و پیپلر صورت پذیرفت [۸]. آن‌ها تغییرشکل ورق فولادی با روکش آلومینیمی و ورق آلومینیمی با روکش فولادی را تحت بارگذاری محوری مورد بررسی قرار دادند. موری و کوریموتو شکل‌پذیری ورق‌های دولایه‌ی آلومینیم و فولاد زنگ نزن را در سال ۱۹۹۶ مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. تاکودا و هاتا، کشش‌پذیری ورق‌های چند لایه آلومینیم ۲۰۲۴ را با ورق‌های فولادی مورد بررسی قرار دادند که در حالت سه‌لایه این ورق‌ها از قابلیت کشش بهتری برخوردار بودند [۱۰]. پارسا و همکارانش، کشش مجدد ورق‌های آلومینیم و فولاد ضدزنگ را مورد بررسی قرار دادند و تاثیرات ضخامت را با ابعاد گرده‌ی اولیه محاسبه نموده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج عملی مقایسه کردند [۱۱]. هوانگ و همکاران به کشش عمیق ورق‌های آلومینیم و مس پرداختند و تاثیرات ضخامت، دیاگرام‌های حد کشش و همچنین پارگی را از دیدگاه مکانیک شکست مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. جلالی‌آقچای و همکاران به مطالعه‌ی تاثیر پارامترهای مواد بر شکل‌پذیری ورق‌های دولایه‌ی Al3004/St12 پرداختند [۱۳]. آن‌ها تاثیر توان کرنش سختی (n)، ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m)، ضریب استحکام (K) و ضریب ناهمسانگردی (r) هر یک از لایه‌ها بر روی شکل‌پذیری ورق دولایه را به صورت تئوری مشخص کردند. لئو و همکارانش شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی AA5052/پلی‌اتیلن/AA5052 را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. آن‌ها نشان دادند ورق ساندویچی شکل‌پذیری بهتری نسبت به ورق تک‌لایه‌ی AA5052 دارد. کرجی‌بانی و همکاران به بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه‌ی فلزی آلومینیم-فولاد در فرآیند کشش عمیق پرداختند [۱۵، ۱۶]. آن‌ها به کمک شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق ورق‌های دولایه آلومینیم-فولاد و تغییر در شرایط فرآیند، اثر پارامترهای مختلف بر روی حد نسبت کشش را مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که با تغییر مقدار ضخامت هر یک از لایه‌ها، تغییر نسبت شعاع انحنای ماتریس به ضخامت ورق دو لایه در مقادیر مختلف ضخامت لایه‌ها، تغییر ضریب اصطکاک و همچنین جابه‌جایی لایه‌ها در ورق دو لایه مقدار حد نسبت کشش تغییر می‌کند، از این رو با در نظر گرفتن تمهیداتی در ورق مورد استفاده و همچنین قالب کشش عمیق، می‌توان حد نسبت کشش را افزایش داد تا بتوان میزان شکل‌پذیری ورق را بهبود بخشید.

بر اساس اطلاعات نگارندگان تاکنون عمده تحقیقات انجام شده بر روی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی بر روی ورق‌های تک‌لایه بوده است و مطالعات اندکی بر روی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه فلزی انجام شده است، و این در حالی است که با توجه به خواص ورق‌های دولایه‌ی فلزی نیاز به بررسی شکل‌پذیری این ورق‌ها به خوبی احساس می‌شود. به طور کلی با توجه به پیشرفت‌های

روی سطح آن را به صورت دایره‌ای و یا مربعی شبکه‌بندی می‌کنند که تغییرشکل این شبکه‌بندی در ناحیه گلوبی شده به اندازه‌گیری کرنش‌های حدی کوچک و بزرگ کمک می‌کند. در طی عملیات شکل‌دهی شبکه‌های دایره‌ای به شکل بیضی در می‌آیند. برای محاسبه کرنش‌های حدی در ناحیه عیب، حداکثر کرنش اصلی در راستای محور بزرگ بیضی و حداقل کرنش اصلی در راستای محور کوچک بیضی به ترتیب تحت عنوان کرنش بزرگ ( $\epsilon_1$ ) و کرنش کوچک ( $\epsilon_2$ ) در نظر گرفته می‌شوند و نمودار حد شکل‌دهی ترسیم می‌شود. نمودار حد شکل‌دهی در صفحه کرنش بزرگ-کرنش کوچک نخستین بار توسط کیلر و بکافن در سال ۱۹۶۳ ارائه شد [۲]. آن‌ها سمت راست نمودار حد شکل‌دهی را با اتساع ورق‌های فولادی کم کربن به دست آوردند. مدل تحلیلی M-K<sup>۱</sup> یا عیوب ماکرو در تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی برای اولین بار توسط مارسینیاک و کوزینسکی در سال ۱۹۶۷ ارائه شد [۳]. در سال ۱۹۶۸ گودوین سمت چپ نمودار را نیز به دست آورد [۴]. او ترکیبی از دو فرآیند کشش ساده‌ی تک محوری (کشش یک نمونه‌ی ساده‌ی مستطیلی از دو انتها) و کشش عمیق (کشیدن لوح به درون قالب با یک سنه‌ی استوانه‌ای) را با استفاده از ورق‌های فولادی کم کربن به کار گرفت و با افزودن آزمایش‌های خود به آزمایش‌های کیلر و بکافن، نمودار کامل حد شکل‌دهی را به دست آورد. هرک در سال ۱۹۷۵ با اتساع ورق‌هایی با عرض‌های مختلف بر روی یک سنه‌ی نیم کره‌ی، دو طرف نمودار حد شکل‌دهی را به دست آورد [۵]. نمودار حد شکل‌دهی معمولاً با یکی از روش‌های زیر تعیین می‌شود:

**روش اول** - آزمون کشش در صفحه‌ی مارسینیاک [۶]. در این روش، ورق فلزی با یک سنه‌ی استوانه‌ای کشیده شده و از یک جدا کننده بین ورق و سنه که در مرکز آن یک سوراخ وجود دارد، استفاده می‌شود. استفاده از این ترکیب باعث تغییر شکل بدون اصطکاک ورق می‌شود. شمای کلی این روش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ شمای کلی از آزمون کشش در صفحه‌ی مارسینیاک [۶]

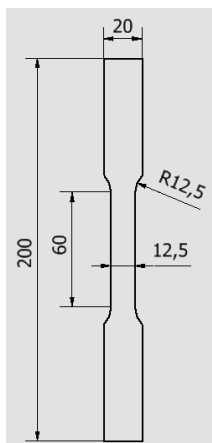
**روش دوم** - آزمون خارج از صفحه‌ی ناکازیم. در این روش، از یک سنه با سر کره‌ی استفاده می‌شود. با توجه به وجود اصطکاک در این آزمون، روان کار مناسب به کار می‌رود. در این آزمون، مسیرهای لازم برای کرنش را می‌توان به کمک روان کارهای مختلف و یا با استفاده از نمونه‌هایی با عرض متفاوت ایجاد کرد [۷]. شمای کلی آزمون ناکازیم در شکل ۲ نمایش داده شده است. عمده تحقیقات به عمل آمده پس از ترسیم تجربی منحنی‌های حد شکل‌دهی، به تخمین تئوری این منحنی‌ها و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر آن، پرداخته است.

<sup>۱</sup>Marciniak- Kuczynski

برقرار باشد. لذا مطالعات انجام شده نشان می دهد که مناسب ترین نوع اتصال برای دو ورق فلزی مس و آلومینیم، جوش انفجاری می باشد [۲۰]. از این رو برای انجام آزمایش تست ناکازیمما بر روی ورق های دولایه فلزی، ورق دولایه مس-آلومینیم که با روش جوش انفجاری تولید شده بود تهیه گردید. این ورق دولایه در مجموع دارای ضخامت ۱ میلی متر بوده است که با اندازه گیری دقیق آن در زیر میکروسکوپ نوری ضخامت لایه مس ۰/۳۷ میلی متر و ضخامت لایه آلومینیم ۰/۶۳ میلی متر اندازه گیری گردید.

۲-۱- آزمون تست کشش ورق دولایه

در این پژوهش به منظور انجام آزمایش های تجربی از ورق های دو لایه با لایه ی درونی آلومینیم (در تماس با سنبه) و لایه ی بیرونی مس (در تماس با ماتریس) با ضخامت ۱ میلی متر استفاده شده است. نمونه های تست کشش ورق های تک لایه ی آلومینیم و مس مطابق با استاندارد ASTM-E8M-04 (شکل ۳) تهیه شد [۲۱]. با استفاده از نتایج تست کشش خواص فیزیکی و مکانیکی هر یک از لایه ها به دست آمد که این خواص در جدول ۳ به نمایش در آمده اند.



شکل ۳ ابعاد نمونه های تست کشش ورق (کلیدی ابعاد به میلی متر)

جدول ۳ خواص فیزیکی و مکانیکی لایه های مس و آلومینیم

ماده	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب استحکام (MPa)	توان کرنش سختی
مس	۸۹۴۰	۱۱۵	۳۰۶	۵۴۰	۰/۱۱
آلومینیم	۲۷۱۰	۶۹	۱۲۲	۲۳۲	۰/۱۲

۳- روش تجربی تعیین نمودار حد شکل دهی ورق های دولایه

۳-۱- آماده سازی نمونه ها

ابعاد نمونه های مورد نیاز برای انجام تست کشش خارج از صفحه ی ناکازیمما در شکل ۴ ارائه شده است. به منظور آماده سازی و برش نمونه ها از دستگاه برش وایرکات استفاده گردید. از آن جایی که در طی انجام فرآیند کشش برای نمونه های با عرض کمتر از ۱۵۰ میلی متر (نمونه های ۱ تا ۴) تمرکز تنش در ناحیه ی دهانه ی حفره ی ماتریس بسیار بالا است، بنابراین به منظور جلوگیری از پارگی در این ناحیه بریدگی های کناری در هندسه این نمونه ها اعمال شده

قابل توجه ای که امروزه در صنایع مختلف به وجود آمده است استفاده از مواد مرکب فلزی با خواص منحصر به فرد که رسیدن به آن ها در یک آلیاژ فراهم نیست رو به فزونی گذاشته است. یکی از روش های ایجاد خواص مکانیکی متنوع در مواد مرکب فلزی تولید ورق های دو لایه فلزی می باشد. استفاده از ورق های دو لایه فلزی فواید بسیاری دارد که از جمله ی آن ها می توان به مواردی نظیر: بهبود شکل پذیری مواد سبک اما سخت، دستیابی به استحکام مکانیکی بالا همراه با انعطاف پذیری خوب، افزایش مقاومت در برابر خوردگی و سایش، افزایش میرایی صوت و ارتعاش، توزیع یکنواخت دما، کاهش برگشت فنری و چین خوردگی و در نهایت کاهش وزن و هزینه ی قطعات تولید شده اشاره داشت [۱۷-۱۹]. با توجه به این مزیت ها نیاز به بررسی شکل پذیری این ورق ها احساس می شود. در پژوهش حاضر منحنی حد شکل دهی ورق های دولایه فلزی آلومینیم-مس با استفاده از آزمون خارج از صفحه ی ناکازیمما به صورت تجربی به دست آمده است.

۲- مواد

آلیاژ آلومینیم مورد استفاده در این تحقیق آلیاژ AA1100 می باشد که ترکیب شیمیایی آن پس از انجام آنالیز شیمیایی به روش کوانتومتری، در جدول ۱ بر حسب درصد وزنی ارائه شده است. همچنین آلیاژ مس مورد استفاده در این پژوهش Cu10100 بوده است که ترکیب شیمیایی آن بر حسب درصد وزنی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ AA1100 مورد استفاده بر حسب درصد وزنی عناصر

Al	Si	Fe	Cu	Mn
Base	۰/۳۵۵	۰/۴۵۶	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۸۳
Mg	Cr	Ni	Zn	Be
۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۰۱
Ti	Pb	Sn	V	Sb
۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۱۲

جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ Cu10100 مورد استفاده بر حسب درصد وزنی عناصر

Cu	Zn	Pb	Sn	P
۹۹/۹۸	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۶
Mn	Fe	Ni	Si	Mg
۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۱۹
Ti	As	B	Sb	Cd
۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
Bi	Co	Al	S	Cr
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۰۰۱۴

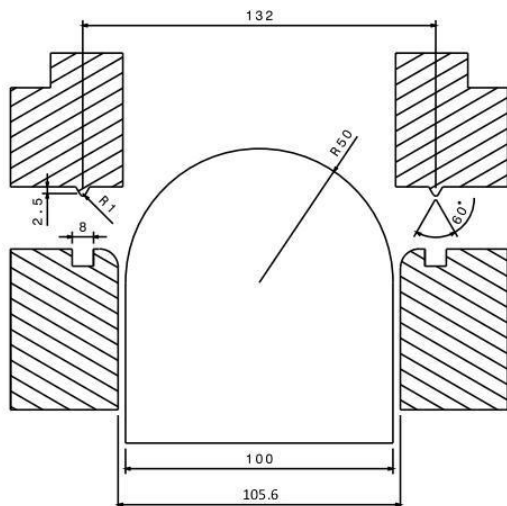
همچنین قابل ذکر است که ورق دولایه فلزی باید پیوند بسیار مستحکم بین لایه ای داشته باشد تا بعد از شکل دهی ورق، همچنان پیوند بین لایه ای

۳-۳- نحوه انجام تست ناکازیمما

جهت تعیین نمودار حد شکل دهی به روش تجربی از قالب ناکازیمما با سنبه‌ی سر کروی ۱۰۰ میلیمتری استفاده شده است. به منظور انجام تست کشش خارج از صفحه از یک پرس هیدرولیک ۳۰ تن استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها با سرعت یکسان ۲ mm/min انجام گرفت. برای انجام آزمایش ابتدا نمونه بر روی ماتریس قرار داده شد. پس از آن که ورقگیر به سمت پایین حرکت کرده و نمونه را به طور کامل در بر گرفت، سنبه تا زمانی که پارگی رخ دهد به سمت بالا حرکت می‌کند. در شکل ۷ مجموعه قالب مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است که هندسه این قالب نیز در شکل ۸ به نمایش در آمده است.



شکل ۷ قالب ناکازیمما مورد استفاده

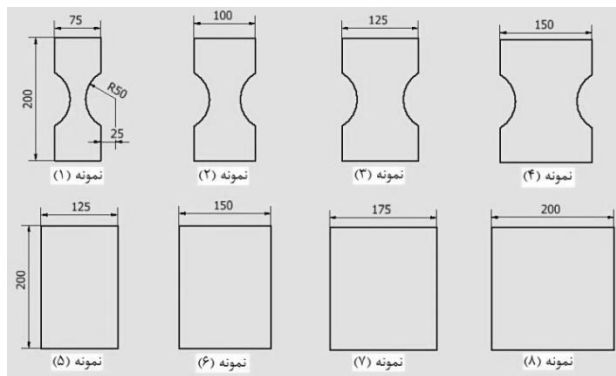


شکل ۸ ابعاد قالب مورد استفاده (کلیه ابعاد به میلیمتر)

۳-۴- اندازه‌گیری کرنش‌های بزرگ و کوچک

برای رسم نمودار حد شکل دهی نیاز به کرنش‌های حدی می‌باشد. لذا تمامی آزمایش‌ها تا لحظه‌ی افت نیروی سنبه و شروع گلوبی شدن ادامه یافته و در این لحظه عملیات متوقف می‌شود. پس از شکل دهی شبکه‌های دایره‌ای به شکل بیضی درآمد که با اندازه‌گیری درصد کرنش‌های مهندسی ایجاد شده

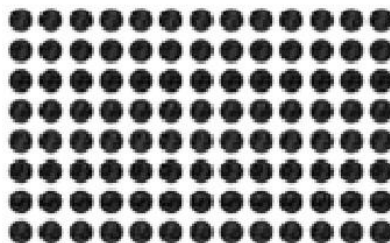
است [۲۲]. شعاع این بریدگی‌های کناری در تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۵۰ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۴ ابعاد نمونه‌های تست ناکازیمما (کلیه ابعاد به میلیمتر)

۳-۲- شبکه‌بندی نمونه‌ها

به منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها پس از شکل دهی ورق، لازم است که نمونه‌ها قبل از شکل دهی شبکه‌بندی گردند. بدین منظور الگوهای متفاوتی جهت شبکه‌بندی ارائه شده‌اند که در بین آن‌ها شبکه‌بندی دایره‌ای، بیشترین کاربرد را دارا می‌باشد. در این پژوهش جهت شبکه‌بندی سطح نمونه‌ها از روش حکاکی الکتروشیمیایی استفاده گردیده است که در آن از شابلون مخصوص با الگوی نشان داده شده در شکل ۵ به تبعیت از استاندارد ایزو ۱۲۰۰۴، [۲۳] استفاده شده است. در شکل ۶ نمونه‌ی شبکه‌بندی شده به روش الکتروشیمیایی قبل از عملیات شکل دهی نشان داده شده است.



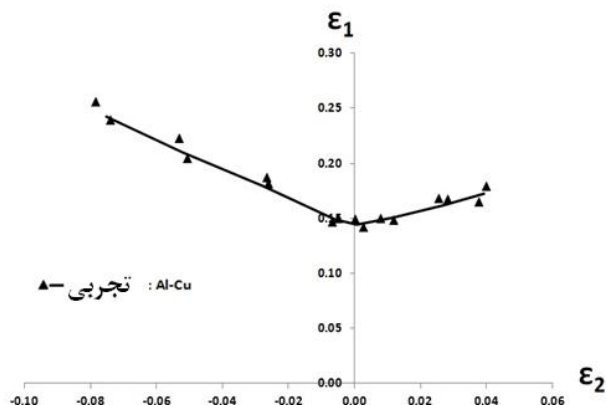
شکل ۵ الگوی مورد استفاده جهت شبکه‌بندی سطح نمونه‌ها



شکل ۶ نمونه‌ای از ورق مشبک شده



تحقیق میزان شکل پذیری ورق دولایه آلومینیم-مس برای نخستین بار مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱۱ نمودار حد شکل دهی ورق های دولایه فلزی مس-آلومینیم

۶- فهرست علائم

نمودار حد شکل دهی	FLD
ضریب استحکام	K
توان کرنش سختی	n
ضریب ناهمسانگردی	r
ضریب حساسیت به نرخ کرنش	m
ضریب پواسون	ν
کرنش	ε
کرنش اصلی	ε <sub>major</sub>
کرنش فرعی	ε <sub>minor</sub>

۷- مراجع

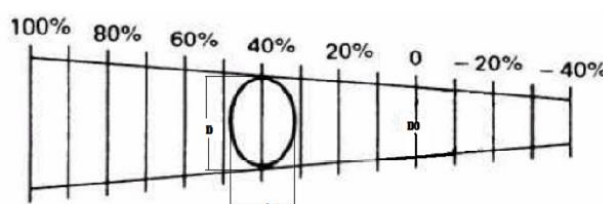
- [1] Karajibani, E. Hashemi, R. and Sedighi, M., "Determination of Forming Limit Curve in Two-Layer Metallic Sheets Using the Finite Element Simulation", Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications, DOI: 10.1177/1464420715593565, 2015.
- [2] Keeler, S.P. and Backofen, W.A., "Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches", Trans. ASM, Vol. 56, pp. 25-48, 1963.
- [3] Marciniak, Z. and Kuczynski, K., "Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp. 609-620, 1967.
- [4] Goodwin, G.M., "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in press shop", SAE Paper No. 680093, 1968.
- [5] Hecker, S. S., "Simple Technique for Determining Forming Limit Curves", Sheet Met. Ind., Vol. 52, pp. 671-676, 1975.
- [6] Pepelnjak, T. Petek, A. and Kuzman, K., "Analysis of the Forming Limit Diagram in Digital Environment", Sheet Metal Erlangen, Vol. 5-8, pp. 697-704, 2005.
- [7] Nakazima, K. Kikuma, T. and Hasuka, K., "Study on the formability of steel sheets", Yawata Tech Rep. Vol. 284, pp. 678-680, 1971.
- [8] Semiatin, S. L. and Piehler, H.R., "Forming limits of sandwich sheet materials", Metall. Trans, 10: 1107-1118, 1979.
- [9] Mori, T. and Kurimoto, S., "Press-Formability of Stainless Steel and Aluminum Clad Sheet", J. Mat. Process. Techno, Vol. 56, pp. 242-253, 1996.
- [10] Takuda, H. and Hatta, N., "Numerical Analysis of the Formability of an Aluminum 2024 Alloy Sheet and Its Laminates with Steel Sheets", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 29, pp. 2829-2834, 1998.
- [11] Habibi Parsa, M. Yamaghuch, K. and Takakura, N., "Redrawing Analysis of Aluminum-Stainless-Steel Laminated Sheet Using FEM Simulations and Experiments", Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, pp. 2331-2347, 2001.

در بیضی به وسیله خط کش مایلر و با استفاده از روابط (۱) و (۲) مقادیر کرنش اصلی و فرعی محاسبه می شوند.

$$\epsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \ln(1 + e_2) \quad (2)$$

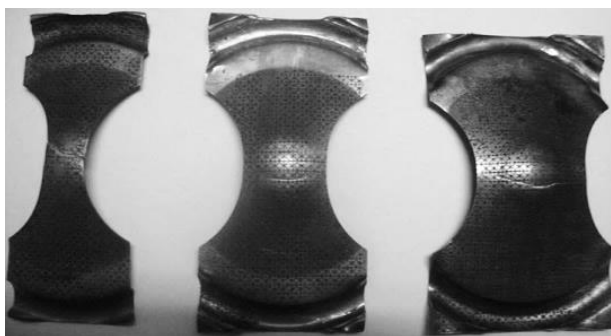
در شکل ۹ نمونه ای از نوار مایلر مشاهده می شود. به منظور انجام اندازه گیری کرنش ها، حداقل تعداد سه دایره تغییر شکل یافته در فاصله مناسب از محل گلوئی اندازه گیری گردیدند. در این مرحله خطایی که بایستی در حین اندازه گیری از آن اجتناب کرد عدم تعامد راستای دید بر روی ناحیه ای اندازه گیری می باشد، که در اینجا با تغییر حالت قرار گرفتن نمونه ها و چندین مرحله تکرار سعی در حداقل کردن این خطا شده است. با انجام فرآیند فوق برای تمام نمونه ها و تعیین کرنش های حدی برای تمامی نمونه ها نمودار حد شکل دهی رسم گردید.



شکل ۹ نوار مایلر مورد استفاده برای اندازه گیری کرنش های اصلی

۴- نتایج آزمون های تجربی

تصاویر نمونه های شکل دهی شده جهت تعیین نمودار حد شکل دهی ورق های دولایه فلزی مس-آلومینیم در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰ نمونه ورق های دولایه فلزی مورد اتساع

شکل ۱۱ نمودار حد شکل دهی تجربی ورق های دولایه فلزی مس-آلومینیم را نمایش می دهد که از آزمون کشش با سنبه ای سر کرومی ناکازیمما به دست آمده است.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش شکل پذیری ورق های دولایه فلزی مس-آلومینیم به صورت تجربی و با انجام آزمون کشش خارج از صفحه ای ناکازیمما به دست آمد. استفاده از ورق های دولایه در صنایع مختلف به دلیل بهره مندی از خواص مختلف ماده همچون وزن سازه، استحکام، مسایل مربوط به خوردگی و... ایجاب می کند تا میزان شکل پذیری آن ها مورد ارزیابی قرار بگیرد. در این

- [12] Huang-Chi, T. Hung, C. and Huang, C. C., "An Analysis of the Formability of Aluminum/Copper Clad Metals with Different Thickness by the Finite Element Method and Experiment", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 49, pp. 1029-1036, 2010.
- [13] Aghchai, A. J. Shakeri, M. and Mollaei Dariani, B., "Influence of Material Properties of Components on Formability of Two-Layer Metallic Sheets", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 66, pp. 809-823, 2013.
- [14] Liu, J. Liu, W. and Xue, W., "Forming limit diagram prediction of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheets", *Mater. Des.* Vol. 46, pp. 112-120, 2013.
- [15] Karajibani, E. Fazli, A. and Hashemi, R., "Numerical and Experimental Study of Formability in Deep Drawing of Two-Layer Metallic Sheets", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, DOI: 10.1007/s00170-015-6978-5, 2015.
- [16] Karajibani, E. fazli, Ali. and garshasbi, Omid, "Experimental investigation and finite element effect on the parameters of traction in deep stretch bilayer sheets", 22th ISME, Ahwaz, Iran, 2015.
- [16] Karajibani, E. Fazl, A. and Garshasbi, O., "Experimental and finite element investigation of the effect of parameters on Limit Drawing Ratio in deep drawing of two layer sheets" 22th ISME, Ahwaz, Iran, 2015.
- [17] Aghchai, A. J. Shakeri, M. and Mollaei Dariani, B., "Theoretical and Experimental Formability Study of Two-Layer Metallic Sheet (Al1100/St12)", *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 9, pp. 1131-1138, 2008.
- [18] Morovvati, M. R. Mollaei Dariani, B. and Asadian-Ardakani, M. H., "A Theoretical, Numerical, and Experimental Investigation of Plastic Wrinkling of Circular Two-Layer Sheet Metal in the Deep Drawing", *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 210, pp. 1738-1747, 2010.
- [19] Bagherzadeh, S. Mollaei Dariani, B. and Malekzadeh, K., "Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations", *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 212, pp. 1840- 1849, 2012.
- [20] Gulenc, B., "Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method", *Mater. Des.* Vol. 29, pp. 275-278, 2008.
- [21] Metals Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of ASTM Standards, ASTM-E8 and ASTM-E517, West Conshohocken, PA, Vol 03.01, 2000.
- [22] Ozturk, F. and Lee, D., "Experimental and Numerical Analysis of Out of-Plane Formability Test", *J Mater Process Technol.* Vol. 170, pp. 247-253, 2005.
- [23] ISO 12004: Metallic Materials- Guidelines for the Determination of Forming Limit Diagrams, ISO, 1997.