



مطالعه تجربی و عددی حد شکل‌دهی ورق دولایه مس-آلومینیوم در دمای بالا

امین علی‌محمدی^۱ و عبدالحسین جلالی افچای^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

ورق‌های دولایه فلزی جایگزین بسیار مهمی برای ورق‌های فلزی تک لایه هستند که دارای مزایای فراوانی از جمله کاهش وزن و نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشند. استفاده از این ورق‌ها موجب صرفه‌جویی بالایی در انرژی می‌شود. از این رو جایگزینی ورق‌های فلزی با ورق‌های دولایه یکی از ضرورت‌های صنعت محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین عیوب در شکل‌دهی ورق‌ها، پارگی است. یکی از راه‌های به تعویق انداختن پارگی، گرم کردن ورق است. با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون تحقیقی راجع به شکل‌پذیری در فرآیندهای گرم ورق دولایه انجام نشده است. در این پژوهش هدف بررسی حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه مس-آلومینیوم در محدوده دمایی گرمکاری به روش تجربی و عددی است. در روش تجربی منحنی حد شکل‌دهی با انجام آزمایش‌های اتساع با سنبه سرکروی و کشش تک‌محوری حاصل گردید. نتایج حاصل از روش تجربی نشان داد که با افزایش دما میزان شکل‌پذیری، افزایش می‌یابد، میزان بیشینه نیروی شکل‌دهی کاهش و همچنین میزان بیشینه ارتفاع حد گنبدی شکل با افزایش دما، افزایش می‌یابد و از طرفی مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار آباکوس تطابق خوبی با مدل تجربی داشته و بهترین مدل برای پیش‌بینی دقیق لحظه گلوبی شدن مدل M-K است.

کلمات کلیدی: شکل‌پذیری؛ ورق دولایه؛ منحنی حد شکل‌پذیری در دمای بالا؛ آزمایش اتساع.

Experimental and Numerical Study on Forming Limit Diagram of Two-Layer Cu-Al Sheet at High Temperature

A. Alimohammadi¹, A. Jalali Aghchai^{2,*}

¹ MSc. Student., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi University of Technology., Tehran.

² Assist. Prof., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi University of Technology., Tehran.

Abstract

Two-layer metallic sheets are very important Alternative for single-layer metal sheets which have many advantages including weight loss and high strength to weight ratio. Using these sheets saves energy. Hence, the replacement of single-layer metal sheets with two-layer metallic sheets is one of the industry's requirements. One of the most important defects in the sheet metal forming is tearing. Heating of the sheet is one of the ways to postpone the tearing. According to previous studies, there has been no research on warm formability of two-layer metallic sheets. In this research, the aim of the study is to determine forming limit diagram of copper-aluminum two-layer sheets at warm temperature range by experimental and numerical methods. In the experimental method, the formability diagram was obtained by Stretch forming tests with hemispherical punch and Tensile tests. The results of the experimental method showed that with increasing temperature, the formability increases, The maximum deformation force is reduced, also the height of the dome-shaped height increases with increasing temperature. On the other hand, the simulated model in Abaqus software has a fairly good fit with the experimental model. The best model for predicting precisely the necking momentum was the M-K model.

Keywords: Formability; Two-Layer Metallic Sheets; Forming Limit Diagram at High Temperature; Stretch Forming Test

۱- مقدمه

یکی از روش‌های مهم که امروزه در صنایع مختلف کاربرد فراوانی دارد، شکل‌دهی ورق‌های فلزی است. امروزه در صنایع مختلف از جمله، تولید بدنه اتومبیل و هواپیما، تولید لوازم اداری و خانگی، به دلیل صرفه‌جویی در تولید انبوه، کاربرد وسیعی پیدا کرده است. روش‌های مختلفی چون برشکاری، خمکاری، اتساع، کشش عمیق، چرخکاری و غلتک‌کاری از جمله فرآیندهای شکل‌دهی ورق می‌باشند [۱]. در سال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های دولایه و چندلایه در صنعت افزایش یافته است. از جمله مزایای این ورق‌ها، نسبت استحکام به دانسیته بالا، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش بالا نسبت به ورق تک‌لایه، رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا را می‌توان نام برد. ورق‌های دولایه فلزی در صنایع مختلفی از جمله، صنایع الکتریکی، نفت و گاز، پتروشیمی، صنایع شیمیایی و در صنعت لوازم خانگی کاربرد دارد. در کنار خواص مطلوب ورق‌های دولایه نسبت به ورق‌های تک‌لایه، شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها یکی از عوامل محدودکننده در جایگزینی ورق‌های تک‌لایه در صنایع مختلف است [۲]. ورق دولایه مورد بررسی در این پژوهش، ورق دولایه آلومینیوم-مس است که در تجهیزات الکترونیکی و رله‌های حرارتی و در لوله‌های انتقال و مخازن سیال برای جلوگیری از خوردگی کاربرد دارد. یکی از مهم‌ترین عیوب در شکل‌دهی ورق‌ها، پارگی است؛ لذا یکی از راه‌های به تعویق انداختن پارگی، گرم کردن ورق است؛ بنابراین در صنعت از شکل‌دهی گرم برای تولید بدون نقص قطعات استفاده می‌شود که از این رو نیاز به درک رفتار مکانیکی ورق تک‌لایه و چندلایه فلزی در دمای بالا رو به فزونی است. مهم‌ترین مسئله در شکل‌دهی فلزات، عدم اطمینان از شکل‌دهی صحیح و بدون نقص قطعه است. در یک فرآیند، محدودیت‌های شکل‌دهی بسته به نوع ماده و شکل منطقه تغییر شکل، تغییر می‌کند. کرنش‌های شکست در هر فرآیند مفروض به نوع ماده نیز بستگی دارند. بررسی شکل‌پذیری ورق را می‌توان شامل به دست آوردن حد تحمل ورق دانست. نازک‌شدگی شدید و بروز پارگی یکی از عیوب عمده در فرآیندهای مختلف شکل‌دهی ورق‌های فلزی از جمله کشش عمیق، خمکاری، شکل‌دهی هیدرولیکی است. شکل‌پذیری ورق بر همین اساس نازک‌شدگی تعریف می‌گردد. نازک‌شدن سریع بخشی از ورق که کرنش‌های آن از

حد تحمل ورق بیشتر شده است، منجر به پارگی ورق می‌شود. در واقع شکل‌پذیری عبارتست از قابلیت تغییر شکل، بدون اینکه شکست و پارگی رخ دهد [۳]. یکی از روش‌های معروف که محدودیت‌های فوق را نشان می‌دهد، نمودار حد شکل‌دهی است، نمودار حد شکل‌دهی معیاری برای ارزیابی قابلیت شکل‌پذیری یک ورق فلزی است [۴]. برای اولین بار کلر و بکافن در سال ۱۹۶۱ دیاگرام حد شکل‌دهی را ارائه دادند؛ اما آنها سمت راست دیاگرام حد شکل‌دهی را محاسبه نمودند [۵]. مدل تحلیلی M-K در تعیین منحنی حد شکل‌دهی برای اولین بار توسط مارسینیاک و کوزینسکی در سال ۱۹۶۷ ارائه شد [۶]. در سال ۱۹۶۸ گودین سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی را بدست‌آورد [۷]. او ترکیبی از دو فرآیند کشش ساده‌ی تک محوری و کشش عمیق با سنبه‌ی استوانه‌ای را با استفاده از ورق‌های فولادی کم کربن و با افزودن آزمایش‌های کلر و بکافن به آزمایش‌های خود، نمودار کامل حد شکل‌دهی را بدست آورد. به طور کلی روش‌های تجربی ارائه شده برای به دست آوردن نمودارهای حد شکل‌دهی به دو گروه عمده تقسیم شده است: کشش در صفحه و کشش خارج از صفحه. در روش اول به نمونه اجازه داده می‌شود که به صورت یکنواخت تغییر شکل دهد و طی آن اصطکاک و هندسه ورق نقش عمده‌ای ایفا نمی‌کنند. روش دوم معمولاً یک سنبه کششی است که در آن اصطکاک و هندسه نیز مهم می‌باشند. نتایج به دست آمده از این دو روش به شکل قابل ملاحظه‌ای با هم متفاوت بوده و نتایج حاصل از روش دوم در عمل بهتر جواب می‌دهد [۸]. در سال ۲۰۰۱، ناکا و همکارانش در یک کار تجربی و تحلیلی تاثیر دو پارامتر دما و سرعت شکل‌دهی را به روی آلیاژ منیزیم - آلومینیوم AA5083 بررسی کردند [۹]. نتایج این تحقیق نشان داد که در محدوده دمایی بالاتر از ۴۳۲ تا ۵۷۳ کلوین در سرعت شکل‌دهی و در مسیرهای مختلف کرنش، کرنش حدی به شدت افزایش می‌یابد. به ویژه در دمای ۵۷۳ کلوین که در سرعت شکل‌دهی پایین قابلیت شکل‌دهی بسیار بالاست که علت آن بالا بودن نرخ کرنش سختی (m) است. از طرفی در دمای زیر ۵۴۷ کلوین قابلیت شکل‌پذیری به توان کرنش سختی (n) وابسته است. جلالی آقچای و همکاران به مطالعه‌ی تاثیر پارامترهای مواد بر شکل‌پذیری ورق‌های دولایه‌ی Al3004/St12 پرداختند [۱]. آن‌ها تاثیر توان کرنش

سرعت سنبه وابسته است و همچنین در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه محل پارگی ورق کمی دور از نوک گنبد برای این ورق مشاهده شد و توزیع کرنش نشان می‌دهد که در دمای ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دو قله در دو طرف نوک گنبد در منحنی توزیع کرنش و همچنین پارگی در مرکز نوک گنبد وجود دارد. در سرعت‌های پایین، شیب سمت راست دیاگرام حد شکل‌دهی با افزایش دما، افزایش می‌یابد؛ اما در سرعت ۵۰۰ mm/min هم این افزایش با میزان کمتر مشاهده می‌شود، همچنین معادله رگرسیون شکل‌پذیری در حالت کرنش محوری را براساس دما و سرعت شکل‌دهی، ضخامت بدست آوردند که نشان دادند در این حالت، همبستگی معادله رگرسیون در اکثر موارد با نتایج تجربی در حدود ۱۰٪ خطا دارد.

۲- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

براساس اطلاعات بدست آمده توسط نگارندگان تاکنون عمده تحقیقات انجام شده روی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه در دمای اتاق یا شکل‌پذیری ورق‌های تک‌لایه در دمای بالا بوده است، و مطالعات بسیار اندکی روی ورق‌های دولایه فلزی در دمای بالا انجام شده است و این در حالی است که با توجه به خواص ورق‌های دولایه فلزی نیاز به بررسی شکل‌پذیری و رفتار مکانیکی این ورق‌ها در دمای بالا به خوبی احساس می‌شود؛ بنابراین دانستن رفتار این نوع ورق در دمای بالا کمک شایانی به پیش‌بینی بهتر شکل دادن این نوع ورق می‌کند. به طور کلی با توجه به پیشرفت‌های قابل توجه‌ای که امروزه در صنایع مختلف به وجود آمده است، استفاده از مواد مرکب فلزی با خواص منحصر به فرد که رسیدن به آن‌ها در یک آلیاژ فراهم نیست، رو به فزونی گذاشته است. یکی از روش‌های ایجاد خواص مکانیکی متنوع در مواد مرکب فلزی تولید ورق‌های دو لایه فلزی است. در این پژوهش به بررسی حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه مس - آلومینیوم در محدودی دمایی گرمکاری به روش تجربی و عددی است. در این پژوهش تاثیر دما روی نمودار حد شکل‌دهی در حالت تجربی و عددی و همچنین بیشینه نیروی شکل‌دهی و ارتفاع حد گنبدی شکل در حالت تجربی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

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. در سال ۲۰۱۰، تسنگ و همکاران و در یک تحقیق تجربی و عددی، شکل‌پذیری یک ورق دولایه مس - آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]؛ در نتیجه این تحقیق مشخص شد که احتمال وقوع شکست در گوشه‌های بلانک بیشتر از جاهای دیگر است؛ همچنین مشخص شد که در صورت زیاد بودن نیروی ورق‌گیر، شکست در گوشه‌های بالایی بلانک رخ می‌دهد. نمودارهای حد شکل‌دهی فرآیندهای تجربی و عددی نیز با یکدیگر مقایسه گردید و این مقایسه نشان داد که نمودار به دست آمده از روش عددی با نمودار حاصل از روش تجربی مطابقت دارد. در سال ۲۰۱۲، وانگ و همکارانش در یک کار تجربی تاثیر دو پارامتر دما و سرعت شکل‌دهی را به روی آلومینیوم AA7075 مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. در این تحقیق برای بررسی حد شکل‌دهی از دو تست LDH و LDR استفاده کردند. از یک نیروی ورق‌گیر با نیرو ۱۰۰ KN با ترمزهای در رینگ استفاده شده است که تا از حرکت و جریان آزاد فلز به حفره ممانعت کند. نیروی سنبه در این تحقیق ۸۰ KN است و یک سیستم ایست به کار رفته که هنگام رسیدن به گلوبی متوقف گردد. نمونه‌ها دارای قطر ۱۶۰ میلی‌متر هستند. در تست‌های LDH و LDR نشان می‌دهند که قابلیت شکل‌دهی در کشش عمیق و اتساع در زمانی کم می‌باشد که دما پایین تر از ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است. از طرفی وقتی دما بالاتر از ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌رود، قابلیت شکل‌دهی افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، برای آلومینیوم AA7075 بهترین قابلیت شکل‌دهی کشش عمیق در ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و برای اتساع در ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد است.

ساتیش و همکارانش در سال ۲۰۱۹ در یک کار تجربی به بررسی اثر دما و ضخامت ورق، سرعت پانچ روی شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند [۱۲]. در این آزمایش از پرس هیدرولیک دوکاره با ظرفیت ۶۰ تن با کنترل جابجایی و سرعت و برای افزایش دما از المان‌های حرارتی در قالب و سنبه سرکروی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شکل‌پذیری به شدت به دما و

۳- روش تجربی

۳-۱- آماده سازی و خواص مکانیکی ورق دولایه

در این پژوهش، برای بررسی شکل‌پذیری ورق دولایه مس - آلومینیوم، آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق آلیاژ AA1100 است که ترکیب شیمیایی آن پس از انجام آنالیز شیمیایی به روش کوانتومتری، در جدول ۱ برحسب درصد وزنی ارائه شده است.

همچنین لایه مسی مورد استفاده در این پژوهش از آلیاژ مس Cu10100 بوده است که ترکیب شیمیایی آن بر حسب درصد وزنی در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین قابل ذکر است، برای این که بعد از شکل‌دهی ورق، همچنان پیوند بین لایه‌های ورق برقرار باشد، باید پیوند بین‌فلزی بسیار مستحکمی بین دولایه داشته باشیم؛ بنابراین با توجه به مطالعات انجام شده از بین روش‌های اتصال‌دهی در ورق‌های دولایه، نشان می‌دهد که مناسب‌ترین اتصال برای دو ورق فلزی مس و آلومینیوم، روش جوش‌انفجاری است

[۱۲]: لذا برای بررسی شکل‌پذیری در دمای بالا روی این ورق‌های دولایه فلزی، از ورق‌های دولایه مس - آلومینیوم استفاده شده است که با روش جوش انفجاری اتصال‌دهی شده‌اند. در این پژوهش ضخامت ورق و هر یک از لایه‌ها ثابت و این ورق دولایه فلزی در مجموع دارای ضخامت ۱ میلی‌متر بوده است که ضخامت لایه مسی ۰/۳۷ میلی‌متر و ضخامت لایه آلومینیومی ۰/۶۳ میلی‌متر است. در این بررسی به منظور تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی ورق دولایه و هر کدام از لایه‌ها، نمونه‌هایی از ورق طبق استاندارد ASTM-E8 [۱۲] آماده و توسط دستگاه آزمایش کشش گرم تا حد پارگی کشیده شده است. در شکل ۱ ابعاد نمونه کشش را نشان می‌دهد. مشخصات حرارتی و مکانیکی ورق دولایه در جدول ۳ ارائه شده است و همچنین خواص هر یک از لایه‌ها استفاده در این پژوهش در دمای مورد آزمایش از طریق آزمون کشش گرم با سرعت پیشروی ۲ میلی‌متر بر دقیقه (شکل ۲) بدست آمده است.

جدول ۲- درصد وزنی ترکیب شیمیایی لایه مس

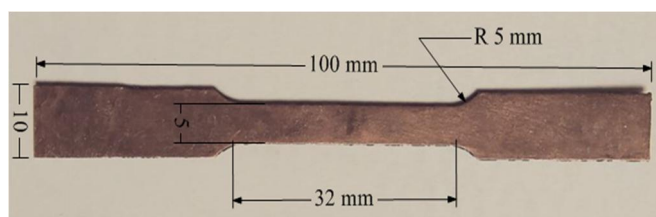
Cu	Zn	Ni	Sn	P	Al	Si
۹۹/۹	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۶

جدول ۱- درصد وزنی ترکیب شیمیایی لایه آلومینیوم

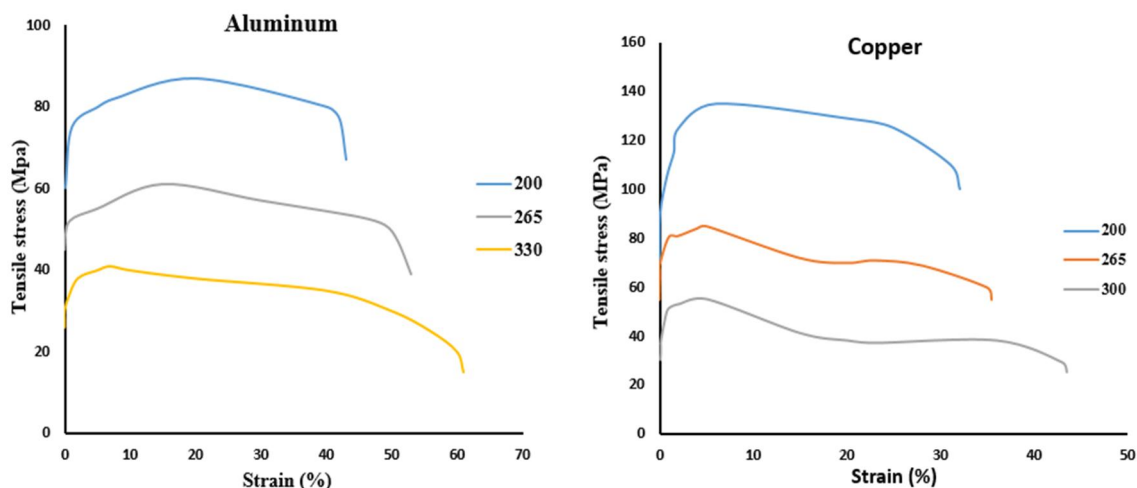
Al	Fe	Cu	Mn	Si	Ti	Z	V
۹۹/۷۵	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱

جدول ۳- خواص حرارتی و مکانیکی ورق دولایه

آلومینیوم	مس	خواص حرارتی و مکانیکی
۲۷۰۰	۸۹۰۰	چگالی (g/mm ³)
۷۰	۱۱۷	مدول یانگ (Gpa)
۰/۳۲	۰/۳۲	نسبت پواسون
۲۳/۶	۱۶/۶	ضریب هدایت حرارتی (10 ⁶) × (1/°C)
۸۹۷	۳۸۵	ظرفیت گرمایی (J/kg×c)
۱۱۵	۲۷۰	استحکام تسلیم (Mpa)
۲۲۴	۴۲۰	استحکام نهایی (Mpa)



شکل ۱- ابعاد نمونه کشش استاندارد بر حسب میلی‌متر [۱۳]



شکل ۲- نمودار تنش کرنش لایه مس و آلومینیوم در دمای بالا

روی لایه خارجی آن‌ها، شبکه‌های دایره‌ای شکل ایجاد شود. در این پژوهش جهت شبکه‌بندی دایره‌ای سطح نمونه‌ها با توجه به این که آزمایش‌ها در دمای بالا انجام می‌شوند، لذا از روش حکاکی لیزر که به تبعیت از استاندارد ایزو ۱۲۰۰۴، استفاده گردیده است [۱۴]. در شکل ۴ نمونه‌ی شبکه‌بندی شده روی لایه آلومینیومی به روش لیزر قبل از عملیات شکل‌دهی نشان داده شده است.

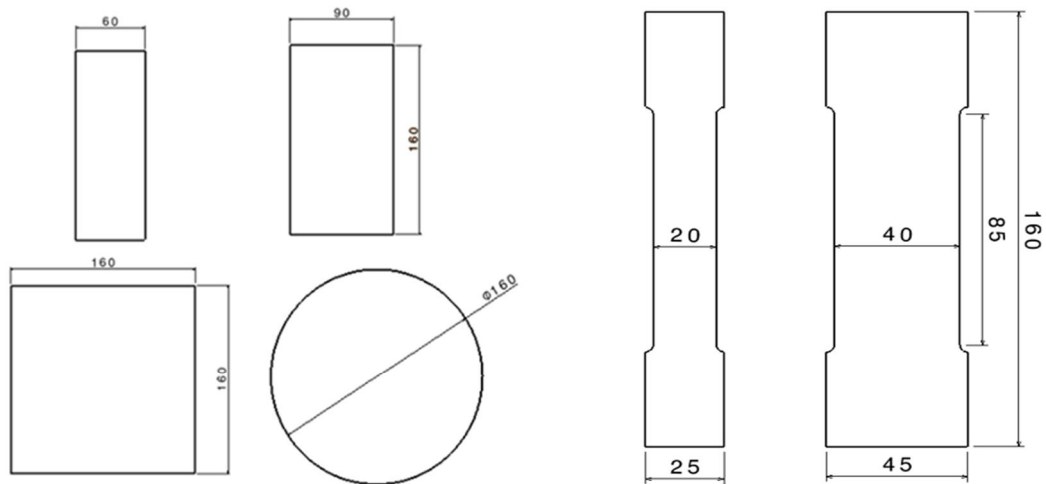
۲-۳- روش تجربی آزمون شکل‌پذیری

به منظور انجام آزمایش‌های اتساع برای بدست آوردن منحنی حد شکل‌دهی در دمای بالا، قالب اتساع با سنبه سرکروی ساخته شد؛ همچنین با توجه به نیروهای وارده محاسبات برای تعداد پیچ‌های قالب انجام شد و در نهایت هشت پیچ با گام ۱ میلی‌متر و به طول ۶۰ میلی‌متر، برای قالب انتخاب گردید. در شکل ۵، تجهیزات آزمایش اتساع شامل ورق‌گیر، سنبه و قالب مشاهده می‌شود. به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی از یک دستگاه کشش و فشار ۱۰۰ تن (Koop-TB) استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. برای انجام آزمایش ابتدا نمونه روی ماتریس قرار داده شد. پس از آن ورق‌گیر به سمت پایین حرکت کرده و نمونه را به طور کامل در برگرفت. برای هم دمایی، ورق در مکان مورد نظر خود و سنبه و ورق‌گیر هم بر روی ورق قرار می‌گیرد سپس با افزایش دما کلیه مجموعه ورق و قالب به دمای مورد نظر رسیده، بعد از همدما شدن

به منظور تعیین منحنی حد شکل‌دهی، دو دسته آزمایش انجام شد. برای بدست آوردن ناحیه سمت چپ منحنی حد شکل‌دهی، کشش تک محوری نوارهای برش‌دار با نسبت عرض به طول‌های مختلف و شعاع‌های مختلف برش-های دایره‌ای استفاده شد. برای تعیین ناحیه کرنش صفحه‌ای و ناحیه سمت راست منحنی حد شکل‌دهی، از اتساع نوار با عرض‌های مختلف، ورق‌های گرد و مربع با گوشه‌های بریده شده استفاده شد. ابعاد نمونه‌های اتساع و کشش تک‌محوری در شکل ۳ ارائه شده است [۱]. به منظور آماده‌سازی و برش نمونه‌ها از دستگاه برش وایرکات استفاده گردید. نمونه‌های مورد نیاز برای انجام تست کشش تک‌محوری و اتساع در ابتدا با توجه به پایین بودن درصد ازدیاد طول نمونه‌ها خریداری شده و همچنین همسان شدن خواص مکانیکی تمامی نمونه‌ها روی همه‌ی نمونه‌ها عملیات حرارتی در شرایط یکسان انجام شد. عملیات حرارتی مطابق با استاندارد ASM به شرح زیر انجام شد: الف) قرار دادن نمونه‌ها در کوره خشک با دمای ۳۶۵ به مدت ۳۰ دقیقه و ب) سرد شدن نمونه‌ها در کوره.

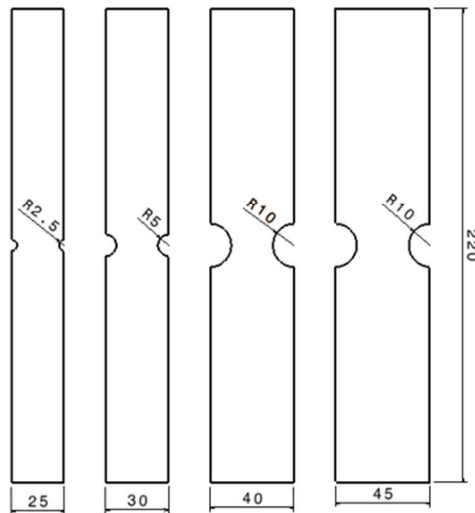
در گام بعدی برای آماده‌سازی سطوح ورق مراحل به ترتیب زیر انجام شده: الف) پلیسه‌گیری نمونه‌ها، ب) تمیزکاری با محلول استون و ج) شست‌وشو با آب و خشک کردن نمونه‌ها.

به منظور اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی پس از شکل‌دهی، باید نمونه‌های برش داده شده، قبل از شکل‌دهی



نمونه‌های برای آزمون اتساع

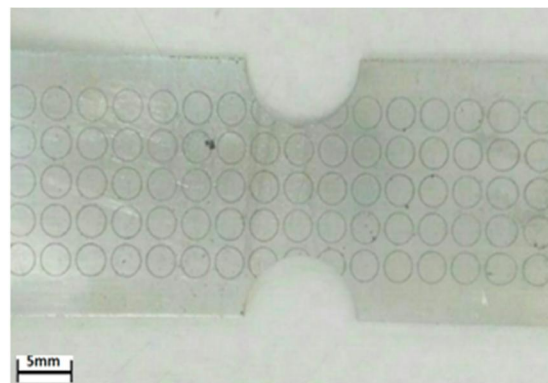
نمونه‌های شیار دار برای آزمون اتساع



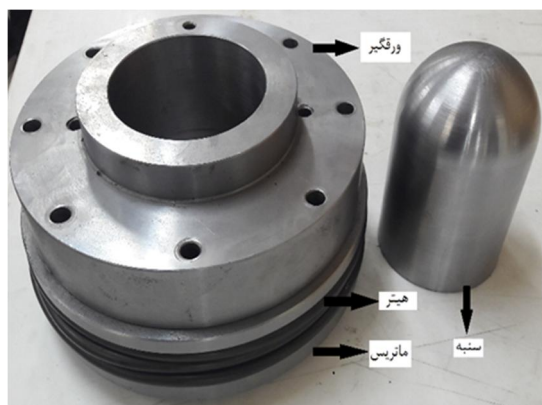
نمونه‌های برش دار برای آزمون کشش تک محوری

شکل ۳- نمونه‌های مورد استفاده برای تعیین تجربی FLD

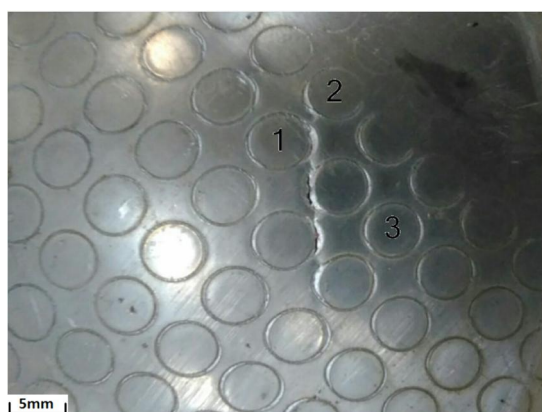
همه‌ی اجزاء قالب و ورق، سنبه برای شکل‌دهی تا لحظه افت نیروی عکس‌العمل به سمت پایین حرکت می‌کند. در تمامی آزمایش‌ها، تا لحظه‌ی گلویی شدن ادامه یافت و کرنش‌ها در منطقه‌ی گلویی اندازه‌گیری شد. مقدار نیروی ورق‌گیر در هر نمونه با انجام آزمایش و همچنین آزمون و خطا به گونه‌ای بدست آمد تا نمونه‌ها دچار پارگی و یا چین‌خوردگی در ناحیه نشود که در تماس با ترمزها قرار دارند. از این رو در نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر و دمای بالاتر نیروی ورق‌گیر کاهش داده شد. به منظور کاهش اصطکاک میان اجزاء قالب



شکل ۴- شبکه‌های دایره‌ای حکاکی شده به روی ورق



شکل ۵- نحوه‌ی قرارگیری هیتر حرارتی در قالب



شکل ۶- انتخاب دایره‌ها برای محاسبه‌ی کرنش‌ها در نزدیکی محل پارگی

۴- روش المان محدود

جهت بررسی المان محدود شکل‌پذیری، از روش مدل‌سازی فرآیند تجربی استفاده شد. برای شبیه‌سازی و تحلیل المان محدود از حل‌گر صریح در نرم افزار آباکوس (Abaqus) استفاده شد. از آن جایی که نقاط مختلف روی منحنی حد شکل‌دهی نشان‌دهنده حالات مختلف کرنشی در لحظه پارگی می‌باشند؛ لذا برای دستیابی به این نقاط لازم است تا هندسه‌های متفاوتی از ورق در هر فرآیند شکل‌دهی مورد استفاده قرار گیرد. در بخش مدل‌سازی هندسی قطعات مطابق آزمایش‌های تجربی ۴ قطعه قالب، ورق‌گیر، سنبه و ورق دولایه مدل شدند. شکل ۷، شماتیک مدل‌سازی انجام شده را نمایش می‌دهد. در بخش تعیین خواص مواد، دو ماده تعریف شد. پوسته‌ی آلومینیوم و مس به عنوان دو ماده همسانگرد در نظر گرفته شد. برای تعیین خواص این دولایه، هر دولایه

و سنبه از پودر گرافیت استفاده شد. تست‌ها در دمای ۲۰۰، ۲۶۵، ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته‌اند. برای حرارت-دهی تجهیزات قالب و ورق از یک هیتر حرارتی با توان ۲kw استفاده شده است که درون شیار محیطی قالب به صورت ماریچ قرار گرفته که در شکل ۵ نشان داده شده است. ترموکوپلی در تماس با ورق و اجزاء قالب قرار دارد که دمای قالب و ورق را با ارسال سیگنال به کنترلر دما، تعیین می‌کند که پس از رسیدن دمای همه‌ی اجزاء قالب و ورق به دمای تنظیم شده، هیتر با دستور کنترلر خاموش شده و بلافاصله بعد از آن تست‌ها انجام می‌گیرد. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها، در نمونه‌هایی که پارگی یا گلولی شدن رخ داده بود، ابتدا محل پارگی و یا گلولی مشخص شد و سپس مطابق با شکل ۶، نزدیک‌ترین بیضی‌های سالم نسبت به محل پارگی انتخاب شد. در هر نمونه حداقل سه بیضی سالم با فاصله حداکثر ۵ میلی‌متر از نقطه‌ی گلولی یا پارگی انتخاب شدند. سپس قطر کوچک و بزرگ بیضی‌ها به دقت اندازه‌گیری شدند؛ لذا با استفاده از قطر کوچک و بزرگ بیضی‌ها و قطر دایره‌های اولیه، کرنش‌های اصلی مهندسی مطابق با رابطه (۱)، ماکزیمم و مینیمم ϵ_e و ϵ_c برای هر دایره‌ی انتخابی محاسبه شدند. با میانگین گرفتن از کرنش‌ها در سه دایره‌ی انتخابی، کرنش اصلی میانگین به دست آمدند. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی (۲)، کرنش‌های اصلی حقیقی ϵ_1 ، ϵ_2 تعیین گردیدند.

$$e = \frac{D2 - D1}{D1} \quad (1)$$

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (2)$$

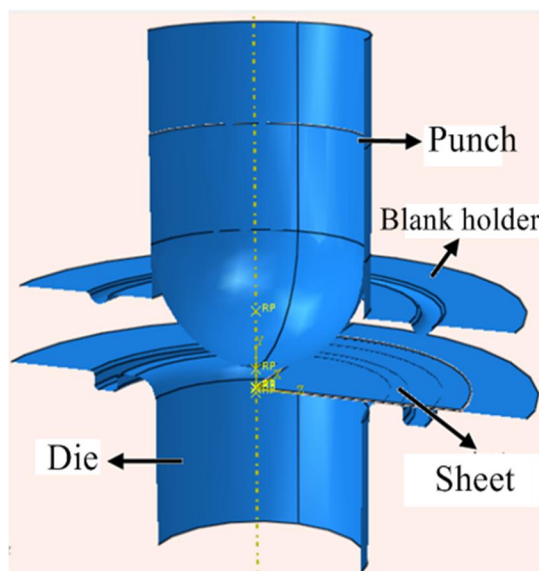
برای اندازه‌گیری قطر بیضی‌ها از نوار میلر استفاده شد. در این مرحله خطایی که بایستی در حین اندازه‌گیری از آن اجتناب کرد، عدم تعامد راستای دید بر ناحیه‌ی اندازه‌گیری است که در اینجا با تغییر حالت قرار گرفتن نمونه‌ها و چندین مرحله تکرار، سعی در حداقل کردن این خطا با انجام فرآیند فوق برای تمام نمونه‌ها صورت گرفت [۴]. این فرآیند برای هر نمونه انجام شد تا کرنش پارگی برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه شد. کرنش ماکزیمم و مینیمم هر نمونه، معرف یک نقطه در منحنی شکل‌دهی ورق دولایه بودند که مجموعه‌ی این نقاط منحنی حد شکل‌دهی ورق دو لایه در دمای مورد آزمایش را تشکیل می‌دهد.

جدول ۴- خواص فیزیکی و حرارتی سنبه و ماتریس

خواص	چگالی (g/mm ³)	مدول یانگ (Gpa)	نسبت پواسون	ضریب انتقال حرارت $(\frac{1}{C}) \times (10^6)$	ظرفیت گرمایی (J/kg×c)
سنبه و ماتریس	۷۸۰۰	۲۱۰	۰٫۲۹	۶	۴۵۰

استفاده شد. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از مقیاس‌دهی جرم در یک تحلیل شبه استاتیکی، باید میزان این پارامتر به حدی انتخاب شود که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی مدل بسیار کم باشد. در این تحلیل، دو گام از نوع دینامیکی صریح برای تحلیل تعریف شد. در این تحلیل، با کاهش میزان مقیاس‌دهی جرم در هر دو گام حل و بررسی نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی مدل، میزان بهینه پارامتر مقیاس‌دهی جرمی بدست آمد. در بخش تعریف شرایط تماسی برای تمامی سطوح از رفتار مماسی استفاده شد.

جهت دستیابی به ضرایب اصطکاکی در حالت عددی می‌توان از مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی سنبه و توزیع ضخامت در نتایج تجربی و عددی استفاده کرد. برای یافتن مقادیر عددی ضرایب اصطکاکی در نقاط تماس بین سنبه و ماتریس، ورق‌گیر، ورق دولایه، با تغییر دادن مقدار ضرایب اصطکاک به طوری که منحنی‌های نیرو - جابجایی سنبه و توزیع ضخامت تجربی و عددی در هر دو کمترین انحراف از هم را دارند، انتخاب می‌شوند. همانطور که در شکل ۱۰ برای نمونه دایروی در دمای ۳۳۰ منحنی نیرو - جابجایی انحراف کمی بین نتایج عددی و تجربی داشته که این نشان از صحت مقدار ضرایب اصطکاک تعیین شده در شبیه‌سازی عددی است. با توجه به این که دولایه نسبت به هم هیچ حرکتی ندارند و بهم جوش خورده‌اند؛ لذا از قید چسب برای اتصال این دولایه استفاده شد. در بخش مش بندی، در هر کدام از لایه‌ها، از المان S4RT که المان ۴ گره‌ای حرارتی از گروه ورق‌ها، مناسب و رایج در استفاده معمول تحلیل ورق، دارای فرمول بندی کاهش‌یافته با قابلیت کنترل پدیده ساعت‌شنی^۳ و کرنش‌های محدود غشایی



شکل ۷- شماتیک مدل‌سازی هندسی در نرم افزار آباکوس

به طور جداگانه تحت آزمون استاندارد کشش گرم قرار گرفتند و مطابق نتایج آزمون کشش استاندارد در هر دما این بخش تعریف شدند؛ همچنین خواص فیزیکی و حرارتی سنبه و ماتریس براساس جدول ۴ ارائه شدند و ضریب انتقال حرارت بین ابزار و ورق $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شد. در قسمت مونتاژ، قطعات به صورت وابسته مونتاژ شدند. برای تعیین مراحل و نوع تحلیل ۲ مرحله تعریف شد. مرحله اول، اعمال نیروی ورق‌گیر و مرحله دوم، اعمال بارگذاری سنبه تا رسیدن به پارگی. برای تعیین نوع تحلیل از تحلیل دینامیکی صریح در شبیه‌سازی المان محدود بهره گرفته شد. در صورتی که یک فرآیند شبه استاتیکی را با زمان واقعی در حل گر صریح تحلیل کنیم، زمان و هزینه محاسباتی حل بسیار بالا خواهد بود. برای شتاب‌دهی به تحلیل، از زمان غیر واقعی و پارامتر مقیاس‌دهی جرم^۱ در نرم افزار آباکوس

² Tie

³ Hourglass

¹ Mass Scaling

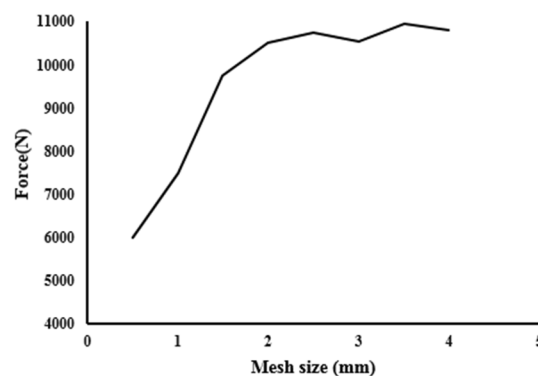
بازهی زمانی که این نسبت بزرگتر از ۷ بود، آن بازهی زمانی به عنوان لحظه‌ی شروع گلوئی در نظر گرفته شد. کرنش‌های اصلی المان سالم در ابتدای این بازه به عنوان حد شکل‌دهی ورق تعیین شدند. به منظور بدست آوردن منحنی حد شکل-دهی براساس نیروی عکس‌العمل سنبه، لحظه‌ی که نیروی عکس‌العمل سنبه کاهش می‌یابد، به عنوان لحظه‌ی گلوئی موضعی در نظر گرفته شد و کرنش‌ها در المان سالم خوانده و به عنوان حد شکل‌دهی در نظر گرفته شد. برای بدست آوردن منحنی حد شکل‌دهی، بر مبنای معیار آسیب منحنی حد شکل‌دهی (FLD CRT) آلومینیوم، زمانی که مقدار این معیار به عدد یک رسید، لحظه‌ی گلوئی موضعی در نظر گرفته شد و کرنش‌های المان سالم خوانده شده و به عنوان حد شکل‌دهی در نظر گرفته شد. نمودار معیار آسیب بر حسب زمان برای یک المان معیوب در ورق معیوب در نمونه دایروی اتساع ورق دولایه در شکل ۹ نشان داده شده است؛ همچنین برای مدل‌سازی نمونه آزمایش کشش تک‌محوری، به روش المان محدود هندسه‌ی ورق مطابق با نمونه‌ی آزمایش، به صورت سه بعدی در این فرآیندها مدل‌سازی شد. برای انتخاب نوع حل‌گر، با توجه به نوع فرآیند از حل‌گر استاتیکی استفاده شد. در قسمت شرایط تماسی یک نقطه مرجع برای تکیه‌گاه غیر مقید تعریف شد و قید کوپلینگ بین نقطه مرجع و آن تکیه‌گاه اعمال گردید. در قسمت اعمال نیرو و دما، یک تکیه‌گاه به طور کامل مقید شد. تکیه‌گاه دیگر در تمامی جهات به استثنای جهت Z مقید گردید؛ همچنین دما مورد آزمایش هم در این گام به مدل اعمال شد. با توجه به نوع نمونه، مقادیر مختلف جایجایی با دامنه‌ی ملایم، به نقطه مرجع تکیه‌گاهی اعمال شد که در جهت Z مقید نشده بود. سایر بخش‌ها و موارد مدل‌سازی، مانند مدل‌سازی فرآیندهای اتساع صورت گرفت.

۵- نتایج و بحث

در شکل ۱۰، نیروی شکل‌دهی بر حسب عمق کشش برای ورق دولایه دایروی در دمای ۳۳۰ درجه، در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، نشان داده شده است. میزان اختلاف حداکثر نیروی شکل‌دهی در آزمایش اتساع تجربی و شبیه‌سازی در لحظه گلوئی برای نمونه دایروی ۴/۸٪ است. در سایر نمونه‌ها اختلاف حداکثر نیروی شکل‌دهی در

انتخاب شد که از معروف‌ترین المان‌های مورد استفاده در تحلیل حرارتی مسائل ورق است. برای تعیین اندازه بهینه المان، اندازه طول المان از ۰/۵ تا ۴ میلی‌متر تغییر داده شد و خروجی نیروی بیشینه سنبه بر حسب طول المان را نمایش می‌دهد. با توجه به ثابت شدن تقریبی نیروی بیشینه سنبه و در نظر گرفتن زمان حل میزان طول بهینه المان ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. پس از اتمام تحلیل، برای تعیین نتایج شبیه‌سازی به صورت زیر عمل شده است که برای تعیین لحظه‌ی گلوئی از سه روش زیر استفاده شد:

- تعیین کرنش اصلی در دو ناحیه سالم و معیوب در صورتی که ناحیه سالم، با فاصله تقریبی ۵ میلی‌متر نسبت به ناحیه معیوب (روش M-K)
- براساس افت عکس‌العمل سنبه (روش RF)
- براساس معیار آسیب منحنی حد شکل‌دهی (FLD CRT)



شکل ۸- نمودار تغییرات نیروی بیشینه سنبه بر حسب طول المان

برای تعیین لحظه‌ی گلوئی ابتدا نمودار کرنش‌های اصلی برای دو المان سالم و معیوب رسم شدند. المان‌های سالم و معیوب با فاصله ۵ میلی‌متر از هم انتخاب شدند. به گونه‌ای که المان معیوب در محلی باشد که بیشترین کرنش را متحمل شده است (گلوئی موضعی). سپس از این دو نمودار خروجی داده‌ی اکسل با بازهی زمانی مساوی گرفته شد. با در نظر گرفتن نمو کرنش‌های المان معیوب در فواصل زمانی به عنوان $\epsilon_{\Delta a}$ و نمو کرنش‌های المان سالم در همان فواصل زمانی به عنوان $\epsilon_{\Delta b}$ و محاسبه‌ی نسبت $A = \epsilon_{\Delta a} / \epsilon_{\Delta b}$ در

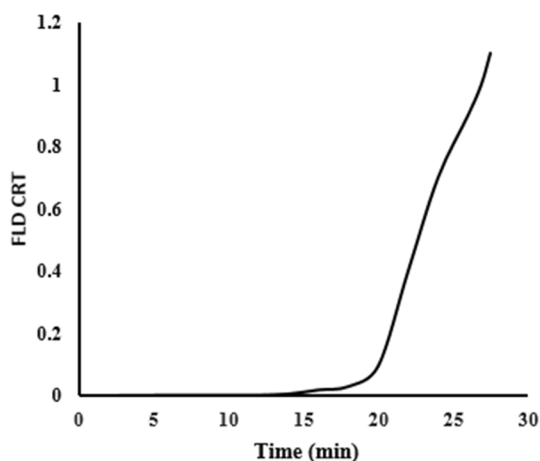
۵-۱- منحنی حد شکل‌پذیری ورق دولایه با روش‌های عددی و تجربی

در شکل ۱۱ منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم - مس در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد حاصل از آزمون تجربی و مدل‌های مختلف المان‌محدود نشان داده شده است که از روش‌های M-K، معیار آسیب (FLD CRT) و نیروی عکس‌العمل سنبه (RF) بهره برده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در اکثر مسیرهای کرنش منحنی معیار M-K و معیار آسیب ورق دولایه مس - آلومینیوم، پارگی را زودتر و عکس‌العمل سنبه پارگی را دیرتر پیش‌بینی می‌کند. مقدار خطا در مقایسه با آزمایش تجربی، برای معیار M-K، تقریباً در حدود ۵ تا ۱۲ درصد، برای معیار آسیب ورق دولایه مس - آلومینیوم تقریباً ۱۰ تا ۲۰ درصد و برای عکس‌العمل سنبه تقریباً ۱۰ تا ۲۰ درصد بود. منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه در دماهای ۲۰۰ و ۲۶۵ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده، میزان شکل‌پذیری به علت تبلور مجدد که باعث حذف اثرات کارسختی می‌شود و همچنین نرم‌شدگی ورق افزایش می‌یابد که باعث کاهش تنش تسلیم و سیلان در ورق می‌گردد. با افزایش دما از ۲۰۰ به ۲۶۵ درجه سانتی‌گراد میزان شکل‌پذیری به‌طور میانگین ۱۲/۷ درصد افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش دما از ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد میزان شکل‌پذیری به‌طور میانگین ۴۶/۵۶ درصد افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در محدوده دمایی ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد شکل‌پذیری به میزان بیشتری افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش دما ورق به محدوده دمایی داغ لایه‌ی آلومینیوم و محدوده‌ی دمایی گرم لایه‌ی مس نزدیک می‌شود و مقدار تبلور مجدد بیشتری در ورق رخ داده و نرم‌شدگی بیشتری خواهیم داشت؛ به همین علت افزایش شکل‌پذیری بیشتری در این محدوده دمایی در ورق رخ می‌دهد.

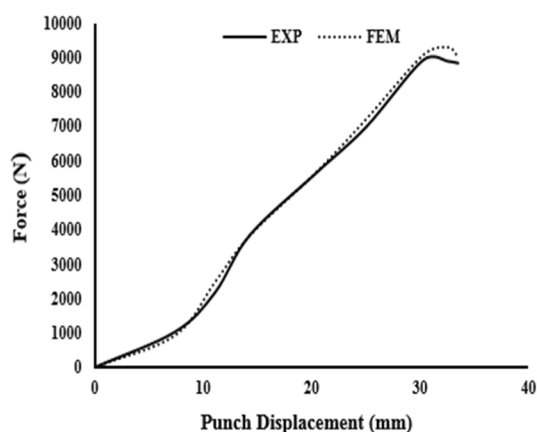
۵-۲- اثر دما بر نیروی شکل‌دهی ورق

همانطور که قبلاً اشاره شد نمونه‌ها تا افت نیروی عکس‌العمل سنبه شکل داده می‌شوند که در شکل ۱۳ نمودار نیروی سنبه به جابجایی سنبه در نمونه دایروی در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. حداکثر نیروی

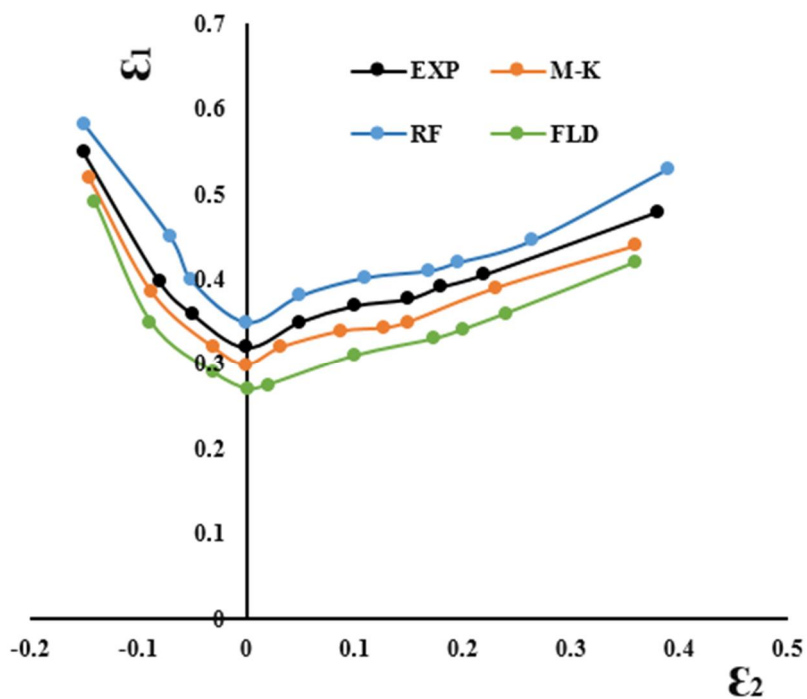
شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش تجربی، بین ۳ تا ۱۰ درصد بود که مناسب به نظر می‌رسد. دلیل این اختلاف در مقدار نیروی شکل‌دهی می‌توان به عدم هم‌محوری سنبه و ماتریس، تاخیر در متوقف کردن سنبه پس از تشخیص افت نیروی عکس‌العمل، عدم هم‌مرکزی سطح قطعه با سطح مقطع سنبه و ماتریس، رسانش حرارتی با محیط و عدم ثابت بودن دما، اختلاف دمای بین اجزاء قالب و ورق، خطای اندازه‌گیری دایره‌ها و بیضی‌ها در آزمایش تجربی و همسانگرد در نظر گرفتن ورق دولایه در شبیه‌سازی المان محدود اشاره کرد.



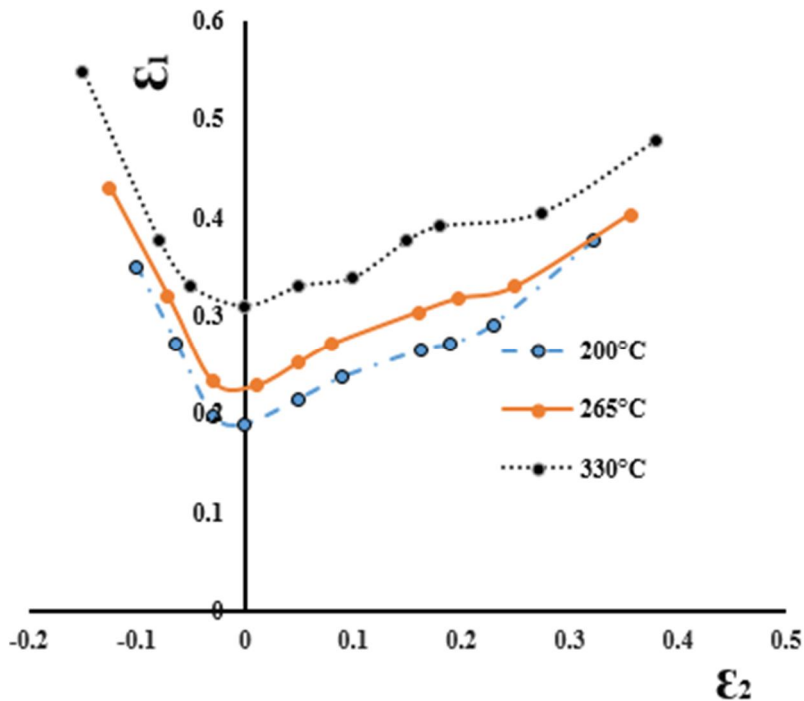
شکل ۹- نمودار معیار آسیب بر حسب زمان برای یک المان معیوب در ورق معیوب در نمونه دایروی اتساع ورق دولایه



شکل ۱۰- نیروی شکل‌دهی تجربی و المان محدود فرآیند اتساع ورق دولایه دایروی بر حسب عمق



شکل ۱۱- منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه در دمای ۳۳۰ درجه حاصل از آزمون تجربی و مدل های المان محدود مختلف



شکل ۱۲- منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه در دمای مختلف حاصل از آزمون تجربی

حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد، علت این افزایش بیشتر حد ارتفاع گنبدی شکل در محدوده‌ی دمایی ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل این که با افزایش دمای بیشتر به علت تبلور مجدد مقدار بیشتری از کارسختی حذف شده و نرم‌شدگی بیشتری در اثر کاهش تنش تسلیم ایجاد گشته و مقدار کرنش تا شکست افزایش می‌یابد و همچنین لایه مسی به محدوده‌ی دمایی گرم و لایه‌ی آلومینیومی به محدوده‌ی دمایی داغ خود نزدیکتر می‌شود که این عوامل باعث افزایش بیشتر ارتفاع گنبدی شکل در این محدوده‌ی دمایی در ورق دولایه می‌گردد.

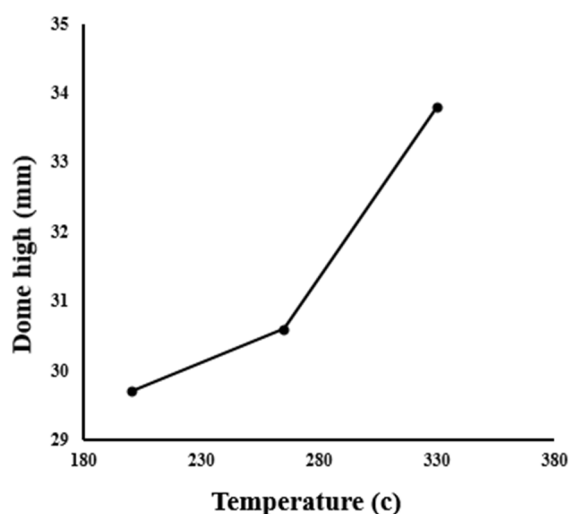
۶- فهرست علائم

نمودار حد شکل‌دهی	FLD
ضریب استحکام	K
توان کرنش سختی	n
ضریب حساسیت به نرخ کرنش	m
کرنش مهندسی	e
کرنش حقیقی	ϵ
کرنش حقیقی اصلی	ϵ_1
کرنش حقیقی فرعی	ϵ_2

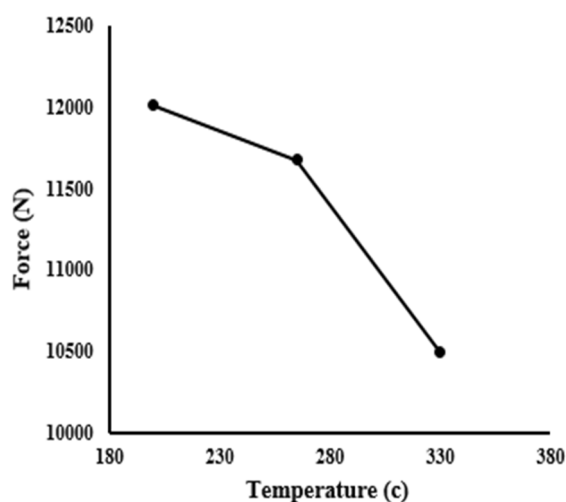
شکل‌دهی نیز با افزایش دما، کاهش می‌یابد که این کاهش مقدار حداکثر نیروی شکل‌دهی، به علت نرم‌شدگی در ورق که موجب کاهش تنش سیلان در ورق می‌شود، رخ می‌دهد. برای نمونه دایروی با افزایش دما از ۲۰۰ به ۲۶۵ درجه سانتی‌گراد حداکثر نیروی شکل‌دهی ۲/۷ درصد کاهش و از ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد حداکثر نیروی شکل‌دهی ۱۰/۱ درصد کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان حداکثر نیروی شکل‌دهی در محدوده‌ی دمایی ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش بیشتری داشته که به علت ایجاد نرم‌شدگی بیشتر و به تبع آن کاهش تنش سیلان و حذف بیشتر اثرات کار سختی کاهش در ورق است.

۵-۳- اثر دما بر ارتفاع حد گنبدی شکل (LDH)

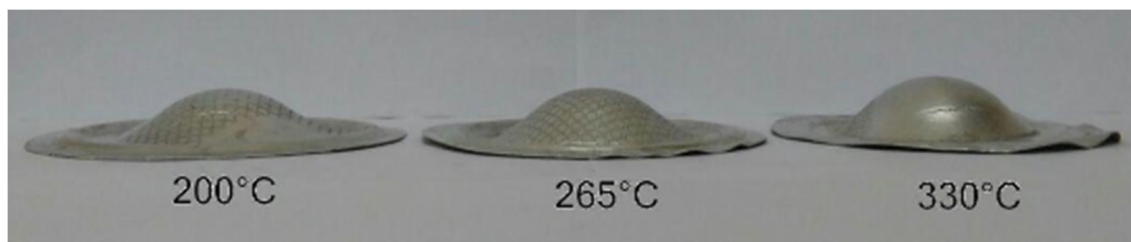
در شکل ۱۴ بیشینه ارتفاع گنبدی شکل نمونه‌های دایروی شکل داده شده، در سه دمای ۲۰۰ و ۲۶۵ و ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده، مقدار بیشینه ارتفاع گنبدی شکل با افزایش دما، افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع گنبدی شکل با کاهش کارسختی و کاهش تنش سیلان و افزایش مقدار کرنش تا شکست است. برای نمونه دایروی مقدار بیشینه ارتفاع گنبدی شکل بین دو دمای ۲۰۰ و ۲۶۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۳ درصد افزایش و بین دمای ۲۶۵ و ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد در



شکل ۱۴- اثر دما بر ارتفاع حد گنبدی شکل در نمونه دایروی



شکل ۱۳- نمودار نیروی سنبه به جابجایی سنبه در نمونه دایروی در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۵- افزایش ارتفاع گنبدی شکل ورق دولایه در دماهای ۲۰۰، ۲۶۵ و ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد

۷- نتیجه‌گیری

پس از انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- منحنی حد شکل‌پذیری ورق دولایه حاصل از معیار آسیب آلومینیوم، پارگی را زودتر و منحنی حاصل از نیروی عکس‌العمل سنبه، پارگی را دیرتر پیش‌بینی می‌کند؛ لذا بهترین مدل برای پیش‌بینی دقیق لحظه گلوبی شدن مدل M-K است.
- ۲- با توجه به نتایج بدست آمده در محدوده‌ی دمایی ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش شکل‌پذیری بیشتری را خواهیم داشت و مناسب‌ترین محدوده‌ی دمایی برای شکل‌دهی گرم این نوع ورق است.
- ۳- حداکثر نیروی شکل‌دهی نیز با افزایش دما، کاهش می‌یابد، در محدوده‌ی ۲۶۵ به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش بیشتری در حداکثر نیروی شکل‌دهی رخ می‌دهد که این امر بیانگر این است که هر چه دما بیشتر شود، نیروی لازم برای شکل دادن این نوع ورق به میزان بیشتری کاهش می‌یابد.
- ۴- مقدار بیشینه ارتفاع گنبدی شکل با افزایش دما، افزایش می‌یابد، مقدار ارتفاع گنبدی شکل بین دو دمای ۲۰۰ و ۲۶۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۳ درصد افزایش و بین دمای ۲۶۵ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد؛ لذا برای دستیابی ارتفاع شکل‌دهی بیشتر در شکل‌دهی گرم این محدوده دمایی مناسب‌ترین محدوده‌ی دمایی است.

۸- مراجع

- [1] Jalali Aghchai A, Shakeri M, Mollaie-Dariani B (2008) Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12). Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture 222(9): 1131-1138.
- [2] جلالی ع، شاکری م، ملایی داریانی ب (۱۳۷۸) بررسی و تحلیل تئوری و تجربی شکل‌پذیری ورق دولایه فلزی Al1100-St12 با استفاده از تئوری لایه معادل. نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران. بیرجند.
- [3] Stoughton TB (2000) A general forming limit criterion for sheet metal forming. Int J Mech Sci 42: 1-27.
- [4] Karajibani E, Hashemi R, Sedighi M (2016) Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation. P I Mech Eng L-J Mat 230(6): 1018-1029.
- [5] Keeler SP, Backofen WA (1963) Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. Trans ASM 56: 25-48.
- [6] Marciniak, Z. and Kuczynski, K., "Limit Strains in the Processes of Steched-Forming Sheet Metal", Int. J. Mech. Sci., VOL. 9, pp. 609-620, 1967.
- [7] Goodwin, G.m., "Application of strain analysis to sheet metal forming problem in press shop", SAE Paper No.680093, 1968.
- [8] Kalpakjian S, Schmid SR (2000) Sheet metal forming process. 4th edn. Prentice-Hall.
- [9] Naka T, Torikai G (2001) The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet. J Mater Process Technol 113(1-3): 648-653.
- [10] Tseng G, Hung C (2010) An analysis of the formability of aluminum/copper cladmetals with different thicknesses by the finiteelement method and experiment. Int J Adv Manuf Technol 49(9-12): 1029-1036.
- [11] Wang L, Luo Y, Friedman P, Chen M (2012) Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075. T Nonferr Metal Soc 22(1): 1-7.
- [12] Raja Satish D, Ravi Kumar D (2019) Formability of AA6061 alloy sheets in warm forming

- [14] ASTM E8 M-04. (2006) Standard test method for tension testing of metallic materials. ASTM International.
- [15] ISO 12004: Metallic Materials-Guidelines for the Determination of Forming Limit Diagrams, ISO, 1997.
- temperature range. P I Mech Eng L-J Mat 233(3): 146442071982950.
- [13] Gulenc B (2008) Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method. Mater Des 29: 275-278.