http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۱ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۰ ص‌ص ۴۹-۵۶

تاریخچه مقاله:
دریافت ۸۹/۱۲/۲۱
پذیرش ۹۰/۶/۳۱
ارائه در سایت ۹۰/۶/۲۲

تحلیل المان محدود و بررسی آزمایشگاهی فرایند شکل‌دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز

مائده‌السادات ضوئی[۱]، محمود فرزین[۲*]، امیرحسین محمدی[۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
*اصفهان، کدپستی ۸۴۱۵۶. farzin@cc.iut.ac.ir

چکیده– آلیاژهای آلومینیوم به دلیل وزن کم و مقاومت خوردگی بالا در صنعت خودرو مورد توجه قرار گرفته‌اند. اما به دلیل شکل‌پذیری کم و کیفیت پایین سطح محصول نهایی حاصل از این آلیاژها در دمای اتاق فرایندی جدید در دهه اخیر تحت عنوان شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز معرفی شده است. این مقاله بررسی روش نوین شکل‌دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز می‌باشد. برای مطالعه فرایند مزبور روش آزمایشگاهی و ساخت تجهیزات مورد نیاز شکل‌دهی ورم[۱] توسط گاز و تحلیل المان محدود (FEM)[۲] ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که امکان شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم در دماهای نزدیک به دمای ذوب آلیاژ، توسط شکل‌دهی با گاز فراهم شده و افزایش دما شکل‌پذیری را افزایش داده و فشار مورد نیاز شکل‌دهی را به میزان قابل توجه‌ای کاهش می‌دهد. نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط نویسنده شامل حداکثر ارتفاع محصول، فشارگاز مورد نیاز شکل‌دهی برای حصول ارتفاع ماکزیمم و مقدار و مکان حداقل ضخامت محصول، تطابق نزدیکی با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری دارد.

کلید واژگان: شکل‌دهی داغ، شکل‌دهی ورم، تحلیل المان محدود، آلیاژ آلومینیوم.

Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet

M. S. Zoei, M. Farzin[1*], A. H. Mohammadi[2]
1-Master of Science, Isfahan Univ. of Tech.
2-Assoc. Professor, Isfahan Univ. of Tech.
3-Master of Science, Isfahan Univ. of Tech.
*P.O.B. 84156, Isfahan Iran. farzin@cc.iut.ac.ir

Abstract -Aluminum alloys are desirable in industry due to their excellent high-strength to weight ratio, corrosion resistance, and weldability. However, at room temperature, the formability and the surface quality of the final product of these alloys are low. So in recent decade, new process, hot metal gas forming, has been introduced. This paper investigated new method of hot aluminum alloys forming using gas. Experimental test for bulge forming was designed and made. In addition to experimental test, finite element analysis of process was done. Results showed that hot metal gas forming provides highest forming temperature for aluminum alloy blank and with increasing blank temperature up to optimum temperature of hot forming, there is reduced pressure forming and significant improvement of formability. Results of experimental test and finite element analysis including determination of optimum temperature for forming of special aluminum alloy, maximum formability in this process, required forming pressure, minimum thickness, thickness and temperature distribution were conformed.

Keywords: Hot forming, Bulge forming, Finite Element analysis, Aluminum alloy.

1. Bulge forming
2. Finite Element Method

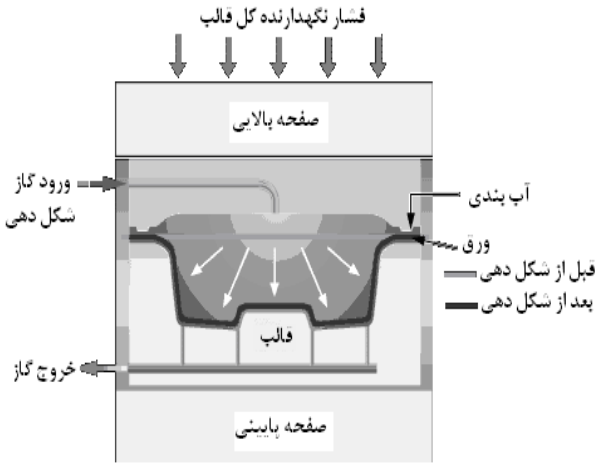
۱- مقدمه

امروزه در صنعت خودرو به منظورکاهش مصرف سوخت و هم‌چنین بهبود انعطاف‌پذیری طراحی و تولید قطعات پیچیده، کاربرد مواد سبک وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم به‌صورت جدی مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین صنعت خودرو نیازمند مواد و پروسه‌های تولید جدید برای طراحی خودروهای سبک و ایمن‌تر می‌باشد[۱].

هیدروفرمینگ پروسه‌ای جدید برای طراحی خودرو سبک می‌باشد، در این روش به‌جای سنبه و یا ماتریس، از فشار سیال برای شکل‌دهی استفاده می‌شود و قطعاتی یکپارچه حاصل می‌شوند که در گذشته با مونتاژ چند قطعه پرسکاری شده تولید می‌شدند. با استفاده از این روش، می‌توان قطعات را با استحکام بالاتر و ضخامت کمتر تولید کرد، بنابراین به کاهش وزن قابل توجهی دست یافت. هم‌چنین با حذف نقاط جوش به واسطه تولید قطعات یکپارچه، صلبیت قطعه افزایش می‌یابد. اما هیدروفرمینگ دارای محدودیت شکل‌پذیری ضعیف فولادها (مخصوصاً استحکام بالا) و آلیاژهای آلومینیوم در درجه‌حرارت محیط و فشار بالای مورد نیاز است. این محدودیت‌ها بر طراحی قطعه، طراحی فرایند، طراحی ابزار و مونتاژ ابزار تأثیر نامطلوب می‌گذارند. علاوه بر این، هیدروفرمینگ زمان سیکلی آهسته‌ای دارد و سرعت شکل‌دهی پایین است، لذا برای تأمین سرعت تولید مورد نظر در صنعت خودرو چندین مرکز کاری بایستی همزمان عمل کنند. در هیدروفرمینگ لوله نیز تغذیه محوری معمولاً فقط در دو انتهای لوله باعث تغییرشکل بیشتر می‌شود و قابلیت کاربرد تغذیه محوری به مقدار قابل توجهی به نسبت طول لوله به قطر آن بستگی دارد. به‌دلیل فشار بالای شکل‌دهی در این فرایند، به پرسی با تناژ بالا نیاز می‌باشد و قالب‌ها باید به گونه‌ای ساخته شوند که فشارهای بالارا تحمل کنند. همچنین استحکام مواد در طی هیدروفرمینگ تغییر نمی‌کند. در نتیجه این ویژگی، به کاربرد ماده خام با ویژگی‌های مطلوب نیاز می‌باشد. این امر دشواری شکل‌دهی و هزینه مواد خام و تناژ پرس مورد نیاز را افزایش می‌دهد. بنابراین تکنولوژی جدید توسط شکل‌دهی در دمای بالا برای غلبه بر این محدودیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند[۲]. علاوه بر این حداکثر درجه حرارت شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی با قالب و هیدروفرمینگ حدود $۳۰۰^{\circ}C$ می‌باشد. به واسطه عدم وجود سیال مناسب با قابلیت تحمل دمای بالا، فرایندی نوین برای شکل‌دهی داغ آلیاژهای آلومینوم توسط گاز ارائه شده‌است.

در این پروسه ورق فلز تا رسیدن به درجه حرارت شکل‌دهی حرارت می‌بینند. ورق گرم‌شده توسط فشار گاز(نیتروژن،آرگون) در سطح پشتی ورق، به داخل ابزار شکل‌دهی کشیده می‌شود. این روش توسط جنرال موتور[1] در سال ۱۹۹۸ به‌عنوان فرایند شکل‌دهی ورق آلیاژ آلومینیوم به شکل‌های پیچیده مانند پانل بدنه خودرو با قابلیت تولید بالا مطرح شد. در این تکنیک استحکام تسلیم ماده با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد و قطعه می‌تواند به یک شکل پیچیده با کاربرد گاز کم فشار و با کاهش نیاز برای پرس تناژ بالا شکل گرفته شود. در فرایند شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز، شکل‌پذیری مواد به‌صورت قابل توجه‌ای توسط مکانیزم‌های تغییرشکل وابسته به درجه حرارت شامل ترکیب خزش نابجائی و لغزش مرزدانه، بهبود می‌یابد. پس از پروسه شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز، قطعه گرم شده و شکل گرفته خنک می‌شود. مایع و یا هوا برای کوئینچ در طول محصول استفاده می‌شوند. توسط کنترل مقدار حرارت داده شده در طی پروسه شکل‌دهی و شرایط کوئینچ (زمان خنک‌کردن، نرخ جریان و یا درجه حرارت مایع) خواص متالورژیکی اجزای حاصله بهبود می‌یابد. به دلیل آن‌که مواد در طی شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز، گرم و سپس کوئینچ می‌شوند، تنش‌های کمی در قطعه نهایی ایجاد شده و نیاز به عملیات حرارتی ثانویه کاهش می‌یابد. در این فرایند کل زمان‌های سیکلی مورد نیاز برای شکل‌دهی کم است، بنابراین مراکز تولیدی شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز توانایی تولید قطعه در نرخ تولید دو تا سه برابر مراکز تولیدی هیدروفرمینگ متداول را خواهند داشت. این قابلیت، تعداد مراکز کاری مورد نیاز برای تأمین نیاز تولید را کاهش داده و بنابراین از هزینه‌ها کاسته می‌شود. شکل ۱ نمونه‌ای از شکل‌گیری ورق داغ توسط شکل‌دهی با اعمال فشار گاز را نشان می‌دهد[۵،۴،۳].

1. General Motors

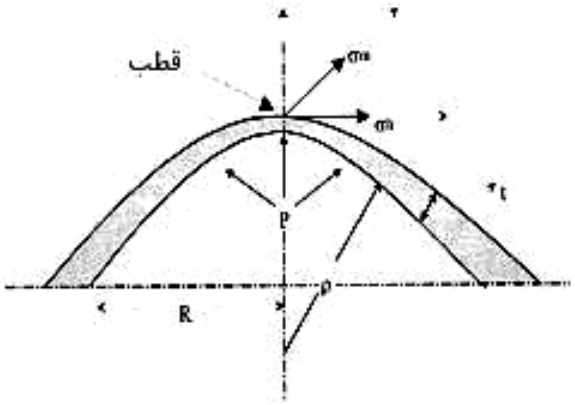


شکل ۱ شکل‌دهی ورق داغ توسط گاز

در این مقاله روش نوین شکل‌دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم AA۳۰۰۳ توسط گاز برای نخستین بار، در شرایط تست عملی و تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. روش حرارت‌دهی به ورق و عایق‌بندی مجموعه به کار رفته در این بررسی، روشی نوین در فرایند شکل‌دهی داغ ورق می‌باشد.

۲- شکل‌دهی ورم

شکل‌دهی ورم به‌عنوان اولین قدم برای وارد شدن به آزمایشات عملی انتخاب گردید. ورق در تست ورم به شکل گنبد[1] تغییر شکل می‌دهد که بالاترین نقطه آن قطب[2] نامیده می‌شود. به منظور جلوگیری از لغزش ورق بین قالب‌ها، نیروی ورق‌گیر بین قالب بالایی و پایینی بایستی به اندازه کافی بزرگ باشد. بنابراین در این تست ورق فقط اتساع یافته و هیچ کششی رخ نمی‌دهد. همچنین تغییر شکل در این تست متأثر از اصطکاک نمی‌باشد. پاره شدن ورق با کاهش ناگهانی فشار مشخص می‌شود. ارتفاع گنبدی حاصله در این تست در مبحث شکل‌دهی به‌عنوان معیار شکل‌پذیری شناخته می‌شود. شکل ۲ ورق شکل‌گرفته در شکل‌دهی ورم را نشان می‌دهد.



شکل ۲ ورق متورم شده در شکل‌دهی ورم

در شکل‌دهی ورم برای شکل‌دهی یک نیم‌کره، تنش‌ها صفحه‌ای و از نوع تنش کششی مساوی دومحور، در نقطه برآمدگی گنبدی شکل فرض می‌شوند. رابطه زیر برقرار است:

$$\sigma_h = \sigma_m \quad \sigma_t = 0 \quad \bar{\sigma} = \sigma_h \qquad (۱)$$

که σ_h، σ_m، σ_t و $\bar{\sigma}$ به‌ترتیب تنش‌های محیطی[3]، نصف‌النهاری[4]، ضخامت[5] و تنش معادل ون میزز می‌باشند. تنش محیطی توسط رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$\sigma_h = \frac{P\rho}{2t} \qquad (۲)$$

که p فشار شکل‌دهی، ρ شعاع انحنا و t ضخامت ورق است. مولفه‌های کرنش برای کشش مساوی دومحوره با فرض حجم ثابت عبارتند از:

$$\varepsilon_h = \varepsilon_m \quad \varepsilon_h + \varepsilon_m + \varepsilon_t = 0 \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon_t \qquad (۳)$$

که ε_h، ε_m، ε_t و $\bar{\varepsilon}$ به ترتیب کرنش‌های محیطی، نصف‌النهاری، ضخامت و کرنش معادل ون میزز می‌باشند. در تست شکل‌دهی با نرخ کرنش ثابت، ضخامت ورق متورم t در زمان شکل‌دهی T به‌صورت رابطه (۴) به‌دست می‌آید:

1. Dome
2. Pole
3. Hoop
4. Meridional
5. Thickness

$$t = t_0 \exp(-\dot{\bar{\varepsilon}}T) \quad (۴)$$

که t_0 ضخامت اولیه ورق و $\dot{\bar{\varepsilon}}$ نرخ کرنش موثر می‌باشد. ترکیب روابط (۱) تا (۴)، رابطه (۵) را برای پروفیل فشار- زمان شکل‌دهی نتیجه می‌دهد.

$$P = 4\frac{t_0}{R}\bar{\sigma}\exp(\dot{\bar{\varepsilon}}T)[\bar{\sigma}\exp(-\dot{\bar{\varepsilon}}T)(1-\bar{\sigma}\exp(-\dot{\bar{\varepsilon}}T))]^{\frac{1}{2}} \quad (۵)$$

که R شعاع قالب و $\bar{\sigma}$ تنش جریانی مؤثر است. بنابراین رابطه (۵) می‌تواند برای کنترل فشار شکل‌دهی در تست آزمایشگاهی به کار برده شود[۵].

همچنین از روابط مذکور در تئوری هیل[1] و نتایج حاصله در مورد کرنش ضخامتی به‌عنوان معیار ناپایداری در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. بنابراین ضخامت نهایی بر اساس تئوری هیل به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

از رابطه (۲) مقدار فشار به‌صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$P = \frac{2\sigma_h t}{\rho} \quad (۶)$$

در ناپایداری $dP = 0$ است و

$$\frac{d\sigma_h}{\sigma_h} = \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dt}{t} \quad (۷)$$

یا

$$\frac{1}{\sigma_1}\frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_t} = 1 + \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\varepsilon_t} \quad (۸)$$

یک رابطه ساده هندسی برای ورم کروی[2] عبارت است از:

$$h(2\rho - h) = R^2 \quad (۹)$$

یا

$$\rho = (R^2 + h^2)/2h \quad (۱۰)$$

که h ارتفاع قطب است.

با توجه به معادلات (۸) و (۱۰) هنگامی نقطه ناپایداری رخ می‌دهد که:

$$\frac{1}{\sigma_h}\frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_t} = \frac{3}{2} - \frac{\rho}{2h} \quad (۱۱)$$

و با بسط چند جمله‌ای ε_3 نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{\sigma_h}\frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_t} \approx \frac{11}{8} - \frac{1}{2\varepsilon_t} \quad (۱۲)$$

اگر منحنی تنش ـ کرنش بر رابطه $\bar{\sigma} = A(B + \bar{\varepsilon})^n$ منطبق شود، که در این رابطه A اندازه استحکام پایه ماده و مستقل از حالت اولیه است و B بیان‌گر حالت اولیه ماده و n اندازه میزان سختی ایجاد شده در اثر کرنش است (کرنش سختی)، کرنش ضخامتی قطبی در فشار حداکثر توسط معادله درجه دوم زیر حاصل می‌شود[۶].

$$11\varepsilon_t^2 + \varepsilon_t(11B - 8n - 4) - 4B = 0 \quad (۱۳)$$

برای یک ماده کاملا آنیل‌شده B صفر است و در نتیجه:

$$\varepsilon_3 = \frac{4}{11}(2n + 1) \quad (۱۴)$$

۳- تست آزمایشگاهی

تجهیزات به کار رفته در این بررسی عبارتند از: قالب، رینگ ورق‌گیر،گاز، ماده اولیه ورق در دو ضخامت ۰/۵ و ۱/۵ میلی‌متر، سیستم حرارتی، مانومتر، ترموکوپل. ماده مورد بررسی در این تحقیق آلیاژ آلومینیومی است که آنالیز ترکیب شیمیایی آن به روش کوانتومتری انجام شده و در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ آنالیز ترکیب شیمیایی ماده اولیه

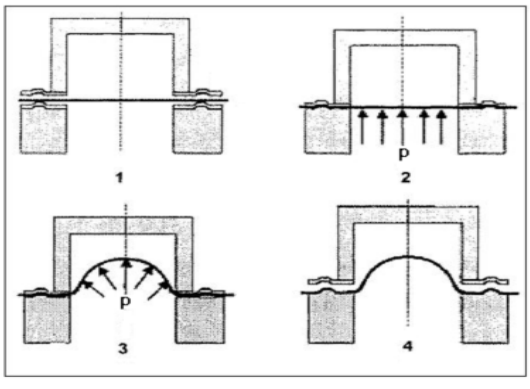
عنصر	Al	Cu	Fe	Zn	Mn	Si
درصدوزنی	۹۸/۱۱	۰/۰۸	۰/۶۷	۰/۰۱	۱/۰۱	۰/۱۱۵

پس از کوانتومتری مشخص می‌شود که ورق، آلیاژ آلومینیوم AA۳۰۰۳ می‌باشد. این آلیاژ یکی از متداول‌ترین

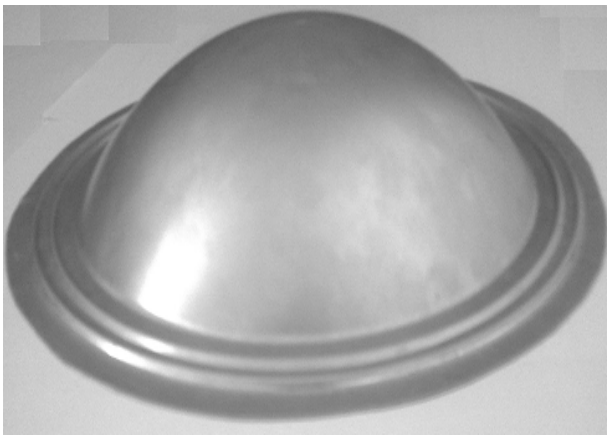
1. Hill
2. Spherical Bulging

آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی است و در مواردی که به قابلیت شکل‌پذیری خوب، مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی و قابلیت جوشکاری مناسب یا هر سه خاصیت فوق نیاز وجود داشته و استحکام بالاتری نیز نسبت به آلومینیوم غیر آلیاژی مد نظر باشد به کار برده می‌شود. حضور منگنز استحکام متوسط و شکل‌پذیری عالی به آلیاژ می‌دهد[۷].

سیستم المان حرارتی قابلیت ایجاد حرارت تا دمای $600^{\circ}C$ را داراست. کلیه المنت‌های حرارتی برقی براساس مقاومت بر سر راه جریان عمل می‌کنند و متشکل از سیمی با مقاومت مناسب و تحمل دمای بالا هستند. سیستم المان حرارتی به گونه‌ای است که قالب عایق بوده و از انتقال حرارت مابین ورق و قالب و اتلاف انرژی حرارتی جلوگیری می‌شود. گاز کاربردی، ازت (نیتروژن) است. مقدار فشار گاز شکل‌دهی کمتر از فشار شروع اولین ترک است. ترموکوپل ابزاری برای اندازه‌گیری دمای هر نقطه به روش تماسی، توسط تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی می‌باشد. این وسیله از اتصال دو مفتول فلزی غیر هم نوع در یک نقطه ساخته می‌شود. هنگامی‌که به محل اتصال این دو مفتول حرارت داده شود، اختلاف پتانسیلی در دو سر این مفتول ها بوجود می‌آید. این اختلاف پتانسیل تابع میزان حرارت اعمال شده است و بنابراین با بررسی میزان ولتاژ خروجی می‌توان درجه حرارت اعمال شده به ترموکوپل را تشخیص داد. شکل ۳ مراحل تست ورم را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از ورق شکل گرفته در تست آزمایشگاهی در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳ مراحل تست ورم



شکل ۴ ورق شکل‌گرفته در تست آزمایشگاهی

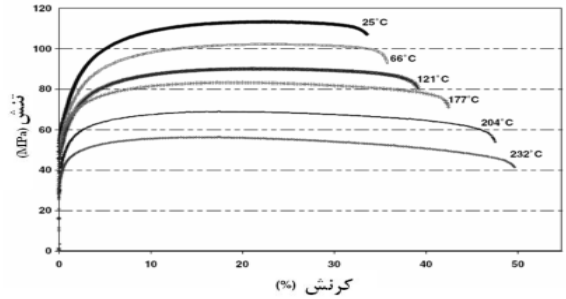
۴- تحلیل المان محدود

هزینه شکل‌دهی ورق فلزی به‌دلیل قطعات پرهزینه مانند قالب، ورق‌گیر و سیستم‌های کنترلی بالا است. علاوه بر این، مرحله هزینه‌بر طراحی و تحلیل قبل از ساخت و مونتاژ نیز وجود دارد و توسعه مرحله عملی فرایند، بازه‌های طولانی از زمان را به خود اختصاص دهد. شبیه‌سازی به منظور تعیین امکان‌پذیری فرایند تولید، تحلیل و بهینه‌سازی کیفیت نهایی قطعات، تعیین پارامترهای فرایند وکاهش تعداد تست‌های آزمایشگاهی به‌کار برده می‌شود. علاوه بر این، داده‌های اولیه در مورد نیروها و فشارهای مورد نیاز شکل‌دهی را نیز به‌دست می‌آورد. با کاربرد روش المان محدود هزینه مرحله طراحی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و همچنین از سعی و خطا کاسته شده و در وقت و هزینه صرفه‌جویی می‌شود.

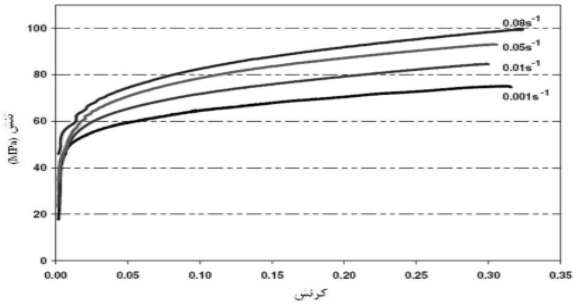
نرم‌افزارالمان‌محدود ABAQUS/EXPILICIT به منظور شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی داغ ورق توسط گاز استفاده شده است. با در نظر گرفتن شرایط تست آزمایشگاهی و اعمال شرایط عایق‌بندی قالب، از انتقال حرارت مابین ورق و قالب در تحلیل صرف نظر می‌شود. ورق به‌صورت یک قطعه تغییرشکل‌پذیر[1] تعریف شده و قالب و ورق‌گیر به‌صورت قطعات صلب[2] مدل‌سازی می‌شوند. در تحلیل نرم‌افزاری، ابعاد دهانه قالب شکل‌دهی و ورق منطبق بر شرایط تست آزمایشگاهی ورم می‌باشد.

1. Deformable
2. Analytical rigid

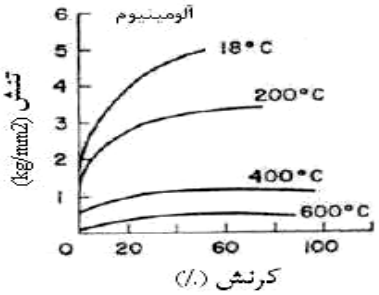
به منظور تعیین نمودار تنش-کرنش ماده در درجه‌حرارت‌ها و نرخ‌های کرنش مختلف، تست‌های کشش داغ تک محوره انجام می‌شود. درشبیه‌سازی خواص AA۳۰۰۳ به‌دست آمده توسط ابددرابو[1] [۸] وکیولاکوف[2] [۹]، مطابق شکل‌های ۵ ، ۶ و ۷ به کار برده می‌شود.



شکل ۵ نمودار تنش-کرنش برای آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳ در دماهای مختلف[۶]



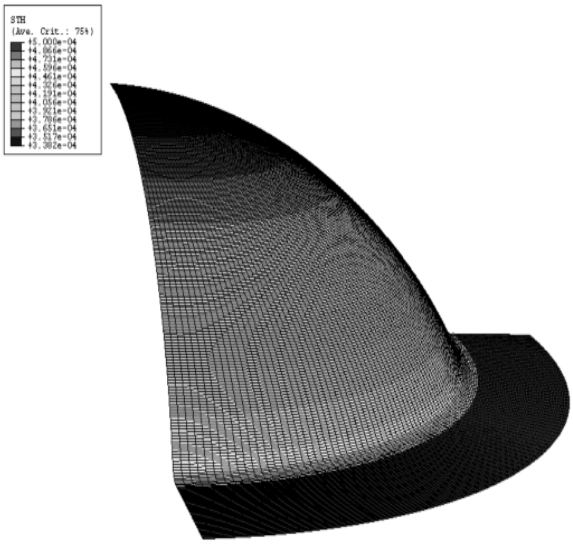
شکل ۶ نمودار تنش-کرنش برای آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳ در نرخ‌های کرنش مختلف در دمای C ۲۰۰[۶]



شکل ۷ نمودار تنش-کرنش برای آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳ در دماهای مختلف[۷]

1. Abedrabbo
2. Kulakov

شکل ۸ ورق شکل‌گرفته در نرم‌افزار و توزیع ضخامت ورق را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، به‌دلیل تقارن مدل، تحلیل در نیمی از هندسه انجام می‌شود و ورق، قالب و ورق‌گیر به‌صورت نیمه متقارن محوری مدل می‌شوند و تنها نیمه راست ورق المان‌بندی شده است.

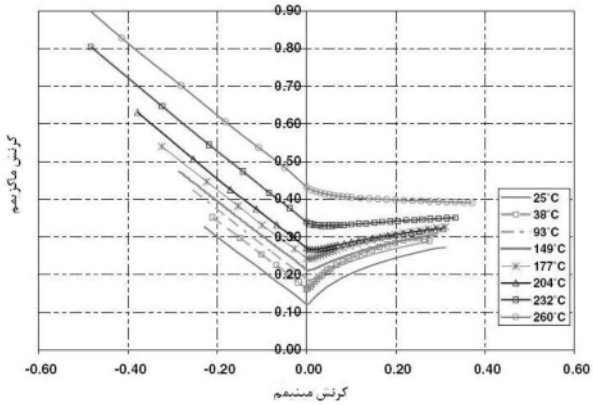


شکل ۸ ورق شکل‌گرفته در نرم‌افزار المان محدود

درشبیه‌سازی نمودارهای حد شکل‌دادن(FLD)[3] برای AA۳۰۰۳ به‌دست آمده توسط ابددرابو [۱۰]، مطابق شکل ۹ به کاربرده می‌شود.

این نمودارها در درجه حرارت اتاق و بالاتر، توسط تابع تسلیم غیرهمسانگرد بارلات[4]، YLD96 و ضرایب مناسب برای هر درجه‌حرارت توسط مدل M-K محاسبه شده‌است. تابع تسلیم غیرهمسانگرد YLD96 ارائه شده توسط بارلات و همکارانش یکی از دقیق‌ترین توابع تسلیم برای ورق‌های آلیاژ آلومینیوم می‌باشد. در محاسبه این نمودارها فرض شده است که مسیر بارگذاری به شرایط خطی نزدیک باشد تا کاربرد منحنی حد شکل‌دادن بر اساس کرنش را برای تعیین دقیق شکست ورق قابل قبول باشد.

3. Forming Limit Diagram
4. Barlat



شکل ۹ نمودارهای حد شکل‌دادن برای آلومینیوم ۳۰۰۳ در چند درجه‌حرارت مختلف[۱۰]

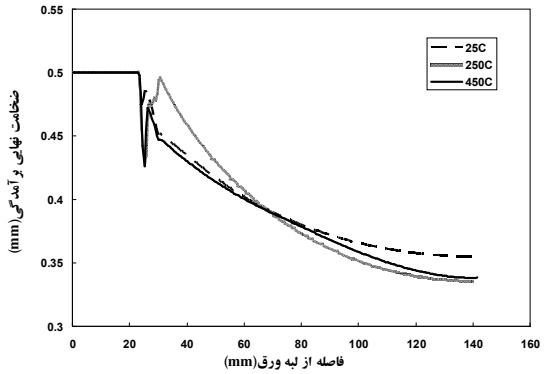
معیار ناپایداری و پارگی ورق در تحلیل نرم‌افزاری در دماهای بالاتر از شکل ۹، بر اساس کرنش ضخامتی حاصله بر اساس تئوری هیل، بررسی می‌شود. بر اساس تئوری هیل با داشتن توان کرنش سختی ماده، کرنش ضخامتی و در نتیجه ضخامت نهایی تعیین می‌شود.

۵- نتایج

نتایج شامل فشار گاز به کاررفته، ارتفاع گنبدی و کمترین ضخامت در نقطه گنبدی شکل در چند نوع شرایط دما و ضخامت اولیه ورق مربوط به تست آزمایشگاهی در جدول ۲ و تحلیل المان محدود در جدول ۳ ارائه شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما مقدار فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش دما ارتفاع گنبدی افزایش می‌یابد و در نتیجه شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم به کار رفته، یعنی مقدار قابلیت ماده برای تحمل تغییر شکل پلاستیک بدون شکست، بهبود می‌یابد.

نحوه توزیع ضخامت در دماهای مختلف شکل‌دهی یکسان می‌باشد(شکل ۱۰). ضخامت ورق در فاصله ورق‌گیری مابین قالب و ورق‌گیر ثابت و برابر با ضخامت اولیه است. در محل شروع خم‌شدن ورق بر روی شعاع قالب، یک محدوده کاهش و سپس افزایش ضخامت ورق وجود دارد و پس از آن کاهش ضخامت تا رسیدن به مینیمم ضخامت در رأس گنبد ورم (قطب) مشاهده می‌شود و پارگی محصول از این نقطه آغاز می‌شود.



شکل ۱۰ تاثیر افزایش دما بر توزیع ضخامت در محصول با ضخامت اولیه ۰/۵ میلی‌متر

مقایسه نتایج حاصل از بررسی تست آزمایشگاهی و المان محدود نشان می‌دهد، تطابق نزدیکی در نتایج وجود دارد. علت تفاوت موجود مابین این نتایج عبارتند از: کاربرد نتایج تست کشش تک محوره در تحلیل المان نرم‌افزاری فرایندی که ماده تحت تنش تک محوره قرار ندارد، کاربرد ضریب اصطکاک مستقل از دما مابین ورق و اجزای قالب در تحلیل المان نرم‌افزاری. با این وجود درصد خطای مابین نتایج قابل قبول می‌باشد.

جدول۲ نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی

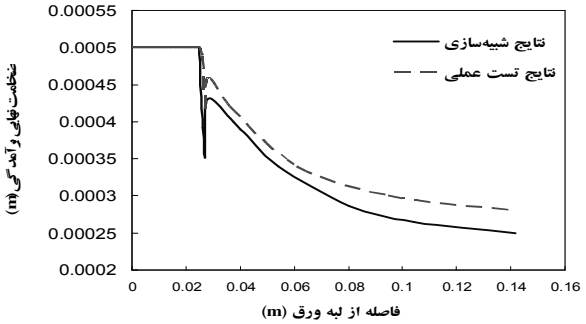
دمای ورق (°c)	ضخامت اولیه ورق (mm)	فشار گاز شکل‌دهی (bar)	ارتفاع حاصله (mm)	کمترین ضخامت (mm)
۲۵	۰/۵	۱۰	۴۸	۰/۳۳
۲۰۰	۰/۵	۶	۴۱	۰/۳۰
۴۵۰	۰/۵	۲	۶۵	۰/۲۸
۲۵	۱/۵	۳۰	۱۰	۱/۴
۳۰۰	۱/۵	۲۶	۳۵	۱/۱

جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل المان محدود

دمای ورق (°c)	ضخامت اولیه ورق (mm)	فشار گاز شکل‌دهی (bar)	ارتفاع حاصله (mm)	کمترین ضخامت (mm)
۲۵	۰/۵	۹	۴۰	۰/۳۲۱
۲۵۰	۰/۵	۴/۵	۴۵	۰/۲۷۱
۴۵۰	۰/۵	۱/۹	۶۷	۰/۲۵۰
۲۵	۱/۵	۴۰	۹/۷	۱/۳۹
۳۰۰	۱/۵	۳۰	۴۱	۱/۳۷

با مقایسه نتایج حاصل از دو مقدار ضخامت اولیه ورق، در هر یک از تحلیل‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مشخص می‌شود که فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق با افزایش ضخامت ورق به میزان قابل توجهی(در بررسی حاضر در حدود ۳ برابر) افزایش می یابد. با توجه به کاربرد فشار گاز در این روش و رعایت ایمنی می توان نتیجه گرفت که این روش در شرایط کاربرد تست فعلی با پرس کم تناژ، برای ورق‌های با ضخامت کم (کمتر از ۱ میلی‌متر) مناسب می‌باشد.

مقایسه توزیع ضخامت در شرایط دمایی حاصل از تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مقایسه توزیع ضخامت حاصل از تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در دمای $450^{\circ}C$ ورق

۶- نتیجه‌گیری

در این بررسی روش نوین شکل‌دهی داغ توسط گاز، امکان رسیدن به بالاترین دمای شکل‌دهی را فراهم می‌کند و با افزایش دمای ورق تا دمای بهینه کاهش قابل توجه فشار مورد نیاز وجود خواهد داشت. کاهش شدید نیروهای شکل‌دهی در پروسه سبب کاربرد پرس با تناژ کم، کاربرد آسان‌تر درجه حرارت و کنترل درجه حرارت، کاهش نیروی نگهدارنده، فضای کارگاهی مورد نیاز کوچک‌تر وکاهش هزینه‌ها می‌شود. تحلیل المان محدود فرایند شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز نشان داد که تطابق مناسب میان نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی برقرار می‌باشد، در نتیجه می‌توان از نتایج شبیه سازی المان محدود، به‌عنوان روش قابل اعتمادی برای بررسی‌های امکان‌پذیری، تعیین شرایط و پارامترهای مؤثر فرایند استفاده نمود.

۷- مراجع

[1] Hartl, Ch, "Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming", Journal of Materials Processing Technology, 167, 383–392, 2005.

[2] Dykstra B, "Hot Metal Gas Forming for Manufacturing Vehicle Structural Components", Metal forming, Sept. 2001, pp.50.

[3] Gardner. B, "Business case for use of Hot Metal gas forming", Metal Forming (October, 2001).

[4] Kim, H.S., Koç, M., Ni, J., "Determination of Proper Temperature Distribution for Warm Forming of Aluminum Sheet Materials", ASME, Vol. 128, pp. 622-632, 2006.

[5] Khraisheh. M, "On the failure characteristics of superplastic sheet materials subjected to gas pressure forming", Published by Elsevier Science Ltd, Scripta mater. 42 (2000) 257–263.

[6] Johnson, W and Mellor, P B, Engineering Plasticity, Ellis Horwood Limited, 1983.

[7] ASM handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special, Tenth Edition.

[8] Abedrabbo, N, Pourboghrat, F and Carsley, J, "Forming of aluminum alloys at elevated temperatures – Part 1: Material characterization", International Journal of plasticity, 22:314-341, 2006.

[9] Kulakov, M, Ultrasonic consolidation of Al3003-H18, Materials Science and Engineering, Clemson University, December 2007.

[10] Abedrabbo, N, Zampaloni, M A, Pourboghrat, F, "Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming", International Journal of Mechanical Sciences, 47, 333–358, 2005.