



بررسی پارامترهای تاثیرگذار فرآیندی در روش هیدروفرمینگ گرم ورق

احسان خسروجردی^۱، محمد بخشی^{۱*}، حمید گرجی^۱، سید جمال حسینی پور^۱، سید محمد حسین پور^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۲
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۷/۲۱
پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۰۸/۱۴

کلمات کلیدی:

شکل دهی گرم
هیدروفرمینگ
پارامترهای هندسی
نسبت کشش حدی
روش تاگوچی

خلاصه: امروزه در صنایع مختلف، به ویژه در صنعت خودروسازی، به منظور کاستن از وزن قطعات و کاهش مصرف سوخت، استفاده از مواد سبکی مانند آلیاژهای آلومینیوم افزایش یافته است. این آلیاژها در دمای اتاق شکل پذیری پایینی دارند. برای رفع این مشکل، شکل دهی در دماهای بالا پیشنهاد شده است. در این مقاله، شکل پذیری ورق آلومینیومی ۵۰۵۲ تحت فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی در حالت گرم بررسی شده است. در ابتدا، پس از بررسی اثر پارامترهای هندسی بر روی توزیع ضخامت و نیروی سنبه، اثر دما، فشار سیال و سرعت سنبه بر روی توزیع ضخامت، نیروی سنبه و نسبت کشش حدی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، بررسی اثر دمای شکل دهی و سرعت سنبه بر کمترین ضخامت قطعه کار با روش تاگوچی انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، دمای بالاتر در حالت های گرم همدمای و غیر همدمای به ترتیب موجب کاهش و افزایش ضخامت قطعه کار می گردد، در حالی که سرعت سنبه بالاتر در هر دو حالت به بهبود ضخامت قطعه کار کمک می کند. مشخص شد که نسبت کشش حدی با افزایش دما در حالت غیر همدمای و با کاهش دما در حالت همدمای افزایش می یابد. بعلاوه، افزایش فشار سیال منجر به نسبت کشش حدی بالاتر می شود.

۱- مقدمه

در طی سال های اخیر، در بسیاری از صنایع، به ویژه در صنایع خودروسازی، به منظور کاستن از وزن قطعات و در پی آن کاهش مصرف سوخت و کم کردن آلودگی، به کارگیری آلیاژهای سبک وزن افزایش یافته است. چپارا و کانوا [۱] بیان نمودند که در طی ۳۵ تا ۴۰ سال گذشته، استفاده از مواد سبک باعث کاهش حدود ۳۰ درصدی در وزن وسایل نقلیه شده است. آبات [۲] بیان نمود که کاهش حدود ۱۰۰ کیلوگرم در وزن وسایل نقلیه، باعث کاهش ۳۸۰ میلی لیتر مصرف سوخت در هر ۱۰۰ کیلومتر می شود.

آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم، شکل پذیری کمی در دمای محیط دارند [۳]. قابلیت شکل پذیری مواد سبک وزن را می توان با بالا بردن دمای افزایش داد [۴]. وانگ و همکاران [۵] شکل پذیری آلیاژ آلومینیومی ۷۰۷۵ با ضخامت ۲ میلی متر را در فرآیند کشش عمیق گرم همدمای مورد بررسی قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که نسبت کشش حدی این آلیاژ تا دمای ۶۰ °C، بدون تغییر می ماند ولی با افزایش دما تا ۱۸۰ °C، نسبت کشش از ۱/۶ به ۲ افزایش می یابد. با گرم کردن بیشتر تا دمای ۲۲۰ °C و ۲۶۰ °C نسبت کشش کم شده و به ۱/۹ می رسد.

چانگ و همکاران [۶] کشش عمیق گرم همدمای را برای ورق آلیاژ منیزیم آزد ۳۱ به طور تجربی بررسی نمودند. آن ها نشان دادند که در دمای شکل دهی کمتر از ۱۵۰ °C در ورق به راحتی پارگی ایجاد می شود، اما در دمای ۱۵۰ °C و سرعت ۱۵ میلی متر بر دقیقه، نسبت کشش حدی به ۲ می رسد. در ادامه بررسی ها این نتیجه حاصل شد که با افزایش دما از ۲۰۰ °C به ۳۰۰ °C نسبت کشش حدی می تواند به ۳ برسد.

کیم [۷] ترکیبی از روش طراحی آزمایش و تحلیل اجزای محدود را برای تعیین پارامترهای بهینه فرآیندی در شکل دهی گرم گرادانی (تجهیزات غیر همدمای) ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۱۸۲ مورد استفاده قرار داد. نتایج وی نشان داد که دمای بالاتر برای قالب و دمای پایین تر برای سنبه جهت دست یابی به شکل پذیری بیشتر، مطلوب می باشد. پارامترهای بهینه به دست آمده، مربوط به دمای ۳۵۰ °C برای ورق گیر و قالب و دمای ۲۵ °C برای سنبه بود.

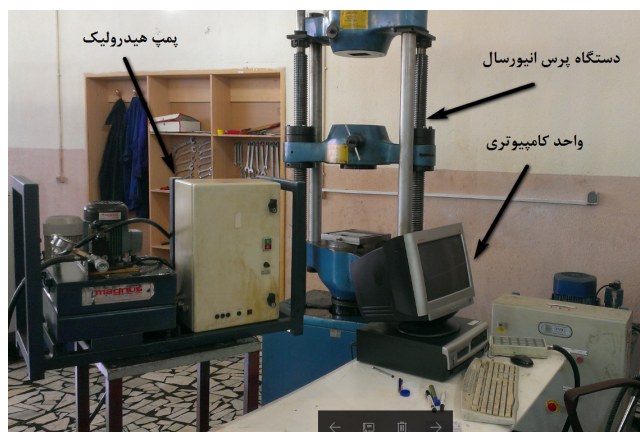
ناکا و همکاران [۸] تاثیر سرعت شکل دهی و دما را بر روی قابلیت کشش ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۱ میلی متر در آزمون کشش عمیق گرم گرادانی، در سرعت های گوناگون شکل دهی و در دمای قالب ۲۵ °C تا ۱۸۰ °C مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که نسبت کشش با افزایش سرعت شکل دهی کمتر و با بالا رفتن دما بیشتر می شود.

*نویسنده عهده دار مکاتبات: bakhshi@nit.ac.ir

۵۰۵۲ تحت فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی در حالت گرم هم‌دما و غیرهم‌دما و مقایسه آن‌ها با یکدیگر انجام شده‌است. در ابتدا، تاثیر پارمترها در این روش بررسی شد. سپس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش‌های تجربی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در ادامه، اثر دو پارامتر هندسی شعاع گوشه سنبه و قالب برای به‌دست آوردن مقدار مناسب برای آن‌ها، مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از روش تاگوچی به مطالعه اثر دمای شکل‌دهی و سرعت سنبه بر کمترین ضخامت قطعه‌کار در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای تولید قطعات استوانه‌ای سرتخت پرداخته شد. یکی از فاکتورهای خروجی مهم در فرآیند هیدروفرمینگ، نسبت کشش حدی است که در این پژوهش اثر دو پارامتر ورودی تاثیرگذار دما در دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما و فشار سیال (با توجه به ماهیت فرآیند) بر روی آن بررسی شده‌است. همچنین توزیع ضخامت و نیروی سنبه برای سه حالت دمایی سرد، گرم هم‌دما و گرم غیرهم‌دما مقایسه شد.

۲- مراحل آزمایشگاهی

شکل ۱ تجهیزات اصلی استفاده شده شامل دستگاه آزمایش نیورسال، جهت تامین نیروی شکل‌دهی، پمپ هیدرولیک جهت تامین فشار روغن و واحد کامپیوتری جهت کنترل سرعت پرس و ثبت نیروی وارده بر آن را نشان می‌دهد. ورق مورد استفاده از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ به ضخامت ۲ میلی‌متر و قطر ۷۲ میلی‌متر است و سیال مورد استفاده، روغن حرارتی با گرانیوی 350cSt بوده که قابلیت تحمل حرارت را تا 300°C دارا می‌باشد.



شکل ۱: تجهیزات اسفاده شده در انجام آزمایش‌ها

Fig1. Equipment used for conducting the experiments

شکل ۲ مجموعه قالب‌های استفاده شده را برای حالت هم‌دما و غیرهم‌دما نشان می‌دهد. در حالت هم‌دما، از گرم‌کن‌های (المنت) پیچیده شده در دور ورق گیر و قالب برای گرم کردن مجموعه قالب استفاده شد. با توجه به طولانی بودن زمان حرارت‌دهی، اجزا برای رسیدن به دمای

ژو و همکاران [۹] روش شکل‌دهی ورق آلیاژ منیزیم آزد ۳۱ را با استفاده از لایه لاستیکی در دمای بالا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در دمای اتاق و دمای 100°C قطعه فنجانی شکل دچار پارگی می‌شود ولی می‌توان آن را در دمای 200°C شکل داد. استفاده از سرعت بالا در این دما باعث کاهش نازک‌شدگی ناحیه شعاع گوشه سنبه می‌شود.

فرآیند هیدروفرمینگ ورق دارای انواع مختلفی است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش هیدروفرمینگ استاندارد و کشش عمیق هیدروفریم [۱۰]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [۱۱]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [۱۲] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱۳] اشاره نمود.

هیدروفرمینگ ورق روشی نسبتاً جدید برای تولید قطعات ورقی است که با استفاده از آن می‌توان قطعات یکپارچه و بدون درز جوش تولید نمود. با ترکیب شکل‌دهی گرم با فرآیند هیدروفرمینگ، فرآیند جدیدی به نام هیدروفرمینگ گرم ورق معرفی شده‌است که افزایش شکل‌پذیری، یکپارچگی قطعات، کاهش فرآیندهای تولیدی و کاهش وزن محصول از مزایای آن است [۱۴]. فرآیند هیدروفرمینگ را می‌توان در حالت سرد، گرم هم‌دما یا گرم غیر هم‌دما انجام داد. در حالت گرم هم‌دما، کلیه اجزای قالب در دمای یکسان قرار دارند، در حالی که در حالت غیر هم‌دما، اجزای قالب در دمای متفاوتی قرار دارند.

گروشه [۱۵] تاثیر استفاده از مزایای هم‌زمان کشش عمیق گرم و فشار سیال را در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی برای دو آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ مورد بررسی قرار داد و با روش کشش عمیق گرم مقایسه کرد. در مجموعه قالب استفاده شده، قسمت فلنج (نواحی بیرونی ورق) با گرم‌کن‌های حرارتی و شعاع گوشه قالب با سیستم آب‌گرد، به ترتیب گرم و سرد شدند. همچنین، با ایجاد مسیرهای آب‌گرد در سنبه، از گرم شدن آن در حین فرآیند جلوگیری شد. مطابق نتایج بدست آمده، هر دو روش شکل‌دهی گرم، موجب افزایش نسبت کشش حدی می‌شود. علاوه بر آن، کشش عمیق هیدرودینامیکی در دو حالت گرم و سرد عمق کشش بیشتری از قطعه را نسبت به حالت کشش عمیق گرم به‌وجود می‌آورد.

روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی در بین روش‌های گوناگون هیدروفرمینگ ورق، در شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا با اقبال بیشتری روبه‌رو شده‌است. در این روش، قرار دادن یک پله در قالب، موجب به‌وجود آوردن فشار شعاعی در لبه ورق در طی فرآیند می‌شود. این فشار باعث جریان بهتر ورق به درون محفظه قالب، افزایش نسبت کشش، کاهش نیروی پرس و شکل‌دهی قطعات پیچیده‌تر می‌شود [۱۳].

به جز کار قبلی نویسندگان مقاله حاضر که در ارتباط با بررسی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی در حالت گرم هم‌دما بود [۱۶]، در این زمینه تاکنون تحقیقی انجام نشده‌است. از این‌رو، در مقاله حاضر، بررسی شکل‌پذیری ورق آلومینیوم آلیاژی

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی، نرم‌افزار آباکوس^۱ و موتور حل صریح^۲ با روش کوپل جابجایی-حرارتی^۳ استفاده شد. با توجه به متقارن بودن هندسه مجموعه قالب و ورق، متقارن بودن بارگذاری مکانیکی و حرارتی، و فرض همسانگرد بودن ورق، از المان‌های متقارن محوری چهارگره‌ای CAX4RT (دارای درجه آزادی دما و جابجایی) برای شبکه‌بندی ورق و اجزا استفاده شد. به جهت ممانعت از تغییر شکل اجزا، قید صلب به آن‌ها اعمال شد. برای ورق، اندازه ابعادی المان‌ها برابر با ۷٪ میلی‌متر تنظیم شده و تعداد ۴ المان در راستای ضخامت، انتخاب شد. خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی ورق در قسمت خواص مواد نرم‌افزار به مدل نسبت داده شد. در جدول ۱، خصوصیات مذکور در دمای محیط آورده شده‌است. نکته دیگر، اندرکنش ورق و مجموعه قالب از دما نادیده گرفته شده‌است. از لحاظ مکانیکی، ضریب اصطکاک در دماهای لحاظ مکانیکی و حرارتی است. از لحاظ مکانیکی، ضریب اصطکاک در دماهای مختلف ثابت و بر طبق مرجع [۱۵] برای ترکیب ورق‌گیر-ورق و قالب-ورق برابر با ۰/۰۶ و مطابق با مرجع [۱۷] برای ترکیب سنبه-ورق برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شد. از لحاظ حرارتی، ضریب هدایت حرارت تماسی بین ورق و تجهیزات برابر با $1400 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شد [۱۴].

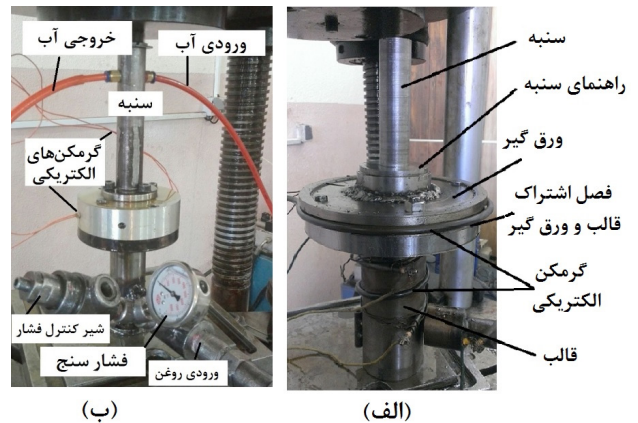
جدول ۱: مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق [۱۸] به همراه خواص حرارتی ورق و قالب [۱۹]

Table 1: Mechanical and physical properties of the sheet [18] as well as thermal properties of sheet and die [19]

واحد	مقدار	مشخصه
MPa	۸۹/۶	استحکام تسلیم
kg/m ^۳	۲۶۸۰	چگالی
GPa	۷۰/۳	مدول الاستیسیته
-	۰/۳۳	نسبت پواسون
MPa	۲۵۰	استحکام نهایی
-	۱۱	درصد ازدیاد طول بیشینه
W/mK	۲۲۰ (۷۰)	ضریب هدایت حرارتی ورق (قالب)
J/kg.K	۹۰۴ (۴۵۰)	ظرفیت گرمایی ویژه ورق (قالب)

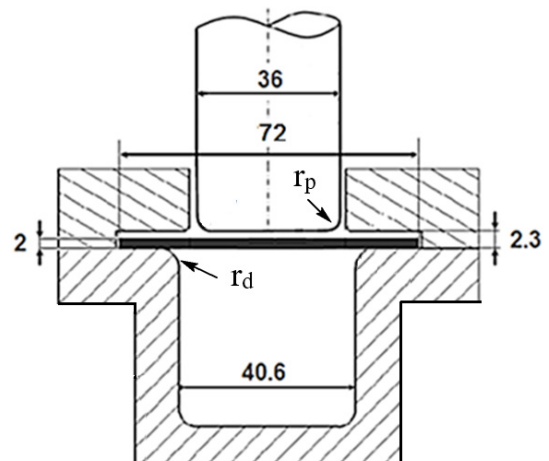
داده‌های تنش-کرنش حقیقی برای ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ در دماهای مختلف در دو نرخ کرنش از مرجع [۱۸] اقتباس شده‌است. به دلیل ماهیت فرآیندهای مورد بررسی که ورق نرخ کرنش‌های بالاتری را نسبت به مقادیر داده شده در مرجع (نرخ کرنش‌های 10^{-3} و 10^{-1} s^{-۱}) تجربه می‌کند، از روش آماری رگرسیون و از معادله توانی برای تخمین داده‌های تنش-کرنش حقیقی در نرخ کرنش‌های بالاتر (10^{-3} و 10^{-1} s^{-۱}) استفاده شده‌است [۱۶]. در معادله (۱)، رابطه توانی بین تنش معادل (pσ) تابعی از کرنش معادل (ε) و نرخ کرنش (ε̇) آمده است:

مورد نظر (حدود ۲۰ دقیقه) و قرار داشتن اجزا در مجاورت هم در این مدت و نیز انتقال حرارت بین آن‌ها، در طول انجام آزمایش، کل مجموعه قالب در دمای یکسان قرار دارند. برای مجموعه قالب هیدروفرمینگ گرم غیرهم‌دما، از گرم‌کن‌های واقع در ورق‌گیر برای گرم کردن مجموعه قالب استفاده شده‌است. برای خنک کردن نواحی وسط، سنبه دارای مجاری آب‌گرد است. قابل ذکر است که به کمک دماسنج‌های قرار داده شده در قسمت‌های مختلف قالب، دمای هر دو مجموعه اندازه‌گیری شده‌اند. به جهت ماهیت فرآیند، از هیچ آب‌بندی در هر دو حالت استفاده نشد. این امر، سبب نشت روغن از فضای محدود مابین ورق‌گیر می‌شود. همین فضای محدود بین ورق‌گیر و قالب، نقش پله جهت تامین فشار شعاعی بر اطراف لبه ورق را ایفا می‌کند.



شکل ۲: مجموعه قالب: (الف) حالت هم‌دما و (ب) حالت غیر هم‌دما
Fig2: Die set: (a) isothermal state and (b) non-isothermal state

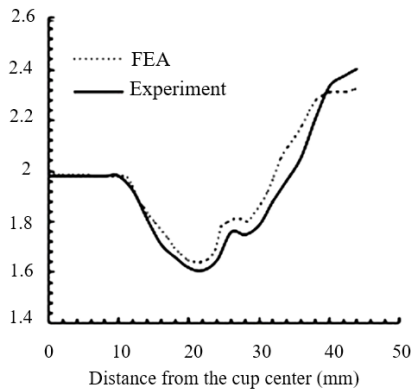
شکل ۳، شماتیک ورق و اجزای قالب و ابعاد آن‌ها را نشان می‌دهد. به جهت بررسی بیشتر دو پارامتر هندسی شعاع گوشه سنبه (r_p) و شعاع گوشه قالب (r_d) در بخش‌های بعد، مقادیری برای آن‌ها مشخص نشده‌است.



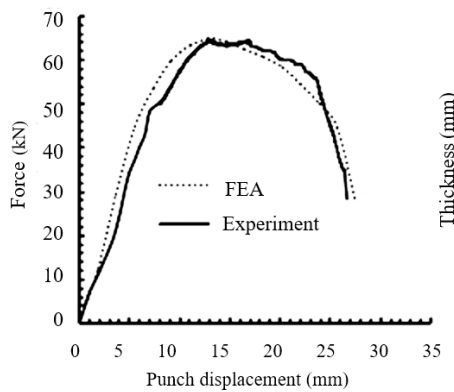
شکل ۳: شماتیک و ابعاد هندسی مجموعه قالب در کنار پارامترهای شعاع گوشه سنبه (r_p) و شعاع گوشه قالب (r_d)
Fig3: Die set schematic and geometrical dimensions alongside punch corner radius (rp) and punch corner radius (rd) parameters

1 ABAQUS
2 Explicit
3 Temp-Disp

آزمایش بدست آمده است، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضخامت کمینه در دو منحنی کمتر از ۳/۵ درصد و نیروی سنبه بیشینه کمتر از ۱ درصد اختلاف دارند. شکل ۵ نتایج مربوط به حالت غیرهم‌دما است که در این حالت، اختلاف ضخامت کمینه و نیروی سنبه بیشینه بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی به ترتیب در حدود ۲/۵ درصد و ۷/۵ درصد می‌باشد. بدین ترتیب، نتایج بدست آمده نشان‌دهنده صحت نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده می‌باشد.



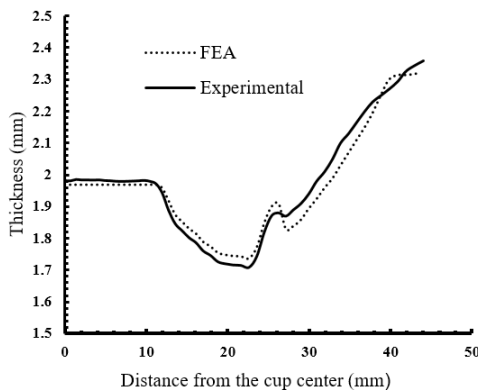
(الف)



(ب)

شکل ۴: نمودار (الف) توزیع ضخامت و (ب) نیروی سنبه در دمای ۲۰۰ °C و سرعت ۵۰ mm/min در حالت گرم هم‌دما

Fig4: Diagrams of (a) thickness distribution and (b) punch force at the temperature of 200 °C and the speed of 50 mm/min at isothermal state



(الف)

$$\sigma_p = C (T)^n \varepsilon^{m(T)} \varepsilon \quad (1)$$

در این معادله، ضرایب n ، C و m به ترتیب ثابت مقاومتی، توان کرنش سختی و توان حساسیت به نرخ کرنش بوده و تابعی از دما (T) می‌باشند. با برازش رگرسیون خطی به لگاریتم داده‌های تنش و کرنش، ضرایب مجهول معادله تابعی از دما بدست آمد که مقادیر آن‌ها در جدول ۲ خلاصه شده‌است. معادله بدست آمده با ضریب تعیین بالایی (بالتر از ۰/۹) به همگی داده‌ها برازش شد.

جدول ۲: ضرایب معادله توانی بدست آمده از روش رگرسیون برای آلومینیوم AA 5052 [۱۶]

m	n	C(MPa)	دما (°C)
۰	۰/۱۴۲	۳۵۹/۷	۲۵
۰	۰/۱۴۲	۳۵۹/۷	۱۰۰
۰/۰۳۷	۰/۰۷۵	۲۸۰/۵	۲۰۰
۰/۱۵۵	۰/۰۴۲	۲۴۸/۳	۳۰۰

۴- طراحی آزمایش تاگوچی

از طراحی آزمایش تاگوچی^۱ برای ارزیابی اثر پارامترهای دما (T) و سرعت سنبه (PS) بر کمترین ضخامت ورق در فرآیند هیدروفرمینگ گرم ورق استفاده شد. با توجه به ماهیت خروجی، حالت بهینه برای کمترین ضخامت قطعه، بیشترین مقدار آن است. جهت انجام بررسی‌ها از نرم افزار مینی‌تب^۲، نسخه ۱۶ استفاده شد. از میان آرایه‌های عمودی مختلف، ابتدا نیاز به سطح‌بندی مناسب و سپس تعیین مناسب‌ترین طرح آزمایش است. به دلیل بزرگتر بودن بازه بررسی دما نسبت به سرعت سنبه، چهار سطح برای دما و دو سطح برای سرعت سنبه مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شد. تاگوچی، آرایه L_8 را که طرح فاکتوری کامل است، برای این حالت پیشنهاد نمود که در بردارنده ۸ حالت از ترکیب مختلف دما و سرعت است. به دلیل بررسی برای دو حالت دمایی هم‌دما و غیرهم‌دما، در مجموع ۱۶ اجرا توسط شبیه‌سازی اجزای محدود که در ابتدا صحت آن مورد تایید قرار خواهد گرفت، انجام می‌گیرد.

جدول ۳: بازه تغییر پارامترهای دما و سرعت

Table3: Variation interval of the temperature and speed parameters

پارامتر	نماد	سطح (-۲)	سطح (-۱)	سطح (+۱)	سطح (+۲)
دما (°C)	T	۳۰	۱۲۰	۲۱۰	۳۰۰
سرعت (mm/min)	PS	۵۰	-	-	۲۰۰

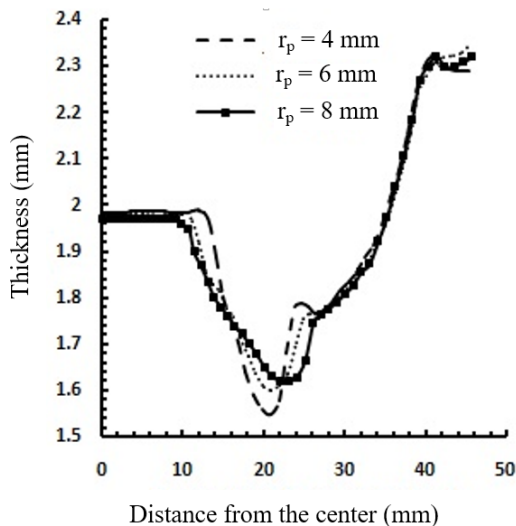
۵- نتایج و بحث

شکل ۴ منحنی‌های توزیع ضخامت و نیروی سنبه را برای قطعه شکل داده شده در حالت گرم هم‌دما که با استفاده از شبیه‌سازی و

1 Taguchi
2 Minitab

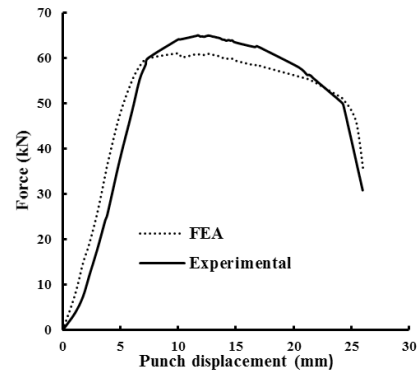
شکل ۷ نمودار توزیع ضخامت قطعات را در شعاع‌های گوشه مختلف سنبه نشان می‌دهد. نازک‌شدگی بیشینه در شعاع‌های گوشه ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر به ترتیب ۲۴، ۱۹/۶ و ۱۹/۳ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۶، در شعاع گوشه سنبه کم‌تر از ۴ میلی‌متر پارگی در قطعه ایجاد می‌شود. با افزایش شعاع گوشه سنبه تا ۶ میلی‌متر، نازک‌شدگی بیشینه به دلیل کم شدن خمش ورق، کاهش می‌یابد و از ۶ میلی‌متر تا ۸ میلی‌متر تغییر چندانی مشاهده نشد. شکل ۸، اثر شعاع گوشه سنبه را بر نیروی بیشینه سنبه نشان می‌دهد. بر طبق این شکل، با افزایش این پارامتر، نیروی بیشینه سنبه تغییر نکرده، ولی جابجایی سنبه تا رسیدن به مقدار بیشینه بیشتر شد. این نتیجه می‌تواند بدین علت باشد که افزایش شعاع گوشه سنبه باعث زیاد شدن محیط در این قسمت شده و در نتیجه جابجایی بیشتری لازم است تا شکل ورق بر روی سنبه، کامل شود و لذا جابجایی مربوط به نیروی بیشینه افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، به دلیل ثابت ماندن نیروی بیشینه سنبه و عدم تغییر محسوس نازک‌شدگی بیشینه با افزایش شعاع گوشه سنبه بعد از ۶ میلی‌متر، شعاع گوشه مطلوب برای سنبه برابر با ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

با انجام شبیه‌سازی و حذف فشار شعاعی مشخص شد که شعاع‌های بزرگتری برای شکل‌گیری قطعه سالم در ترکیب‌های مختلف شعاع گوشه سنبه و قالب در مقایسه با حالت قبل نیاز است. این بدان دلیل است که فشار شعاعی در جریان یافتن بهتر ورق به درون حفره قالب نقش موثری ایفا می‌کند. در حالت بدون فشار، استفاده از شعاع سنبه ۸ میلی‌متر مقداری مناسب برای فرآیند است.



شکل ۷: توزیع ضخامت در شعاع‌های گوشه مختلف سنبه و شعاع گوشه قالب ۶ میلی‌متری، به‌دست آمده از شبیه‌سازی

Fig7: Thickness distribution at the different punch corner radii and die corner radius of 6 mm, obtained from the simulation



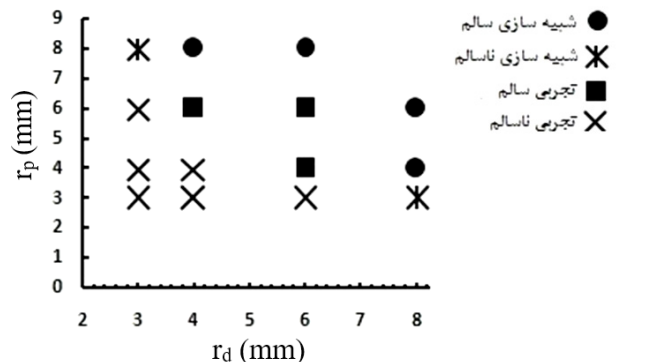
(ب)

شکل ۵: نمودار (الف) توزیع ضخامت و (ب) نیروی سنبه در دمای ۲۰۰ °C و سرعت ۵۰ mm/min در حالت گرم غیر هم‌دما

Fig5: Diagrams of (a) thickness distribution and (b) punch force at the temperature of 200 °C and the speed of 50 mm/min at non-isothermal state

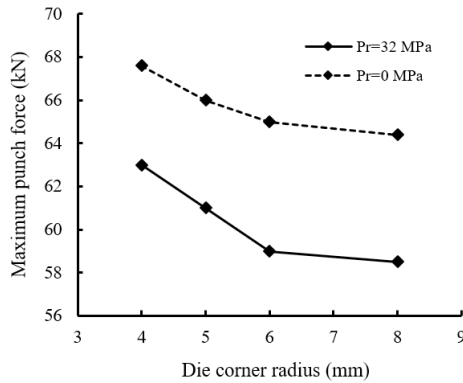
۵-۱- بررسی پارامترهای هندسی

در این بخش، به بررسی تاثیر دو عامل هندسی مهم شعاع گوشه سنبه (r_p) و شعاع گوشه قالب (r_d) (مطابق با شکل ۳) در هیدروفرمینگ قطعات استوانه‌ای پرداخته می‌شود. برای انجام بررسی‌ها، آزمایش‌هایی در حالت هیدروفرمینگ هم‌دما، دمای ۲۵۰ °C، فشار ۳۲ مگاپاسکال و در شعاع‌های مختلف گوشه سنبه و قالب صورت گرفت. این بررسی، برای حالتی که فشار شعاعی (Pr) اعمال نشود نیز انجام شد. در شعاع‌های گوشه سنبه و قالب ۳ میلی‌متر، به‌خاطر عدم جریان مناسب و کشش ناکافی ورق در ناحیه شعاع گوشه سنبه، پارگی ایجاد شد. در شعاع گوشه سنبه کم‌تر از ۴ میلی‌متر مشاهده شد که در همه شعاع‌های گوشه قالب، در قطعه پارگی ایجاد می‌شود. آزمایش‌های دیگری در شعاع گوشه سنبه ۴ و شعاع‌های گوشه قالب ۳، ۴ و ۶ میلی‌متر انجام شد. مشاهده شد که در شعاع‌های گوشه قالب ۳ و ۴ میلی‌متر قطعه پاره شد ولی برای حالت ۶ میلی‌متر قطعه سالم شکل گرفت. در ادامه، با انجام آزمایش در شعاع گوشه سنبه ۶ میلی‌متر و شعاع‌های گوشه قالب ۳، ۴ و ۶ میلی‌متر، ملاحظه شد که به‌جز در مقدار ۳ میلی‌متر، در بقیه شرایط، قطعه سالم شکل گرفت. نتایج تجربی در شعاع‌های گوشه مختلف در شکل ۶ آمده است. علاوه بر شبیه‌سازی موارد یاد شده، دیگر حالت‌های شبیه‌سازی نیز در این شکل نشان داده شده‌اند.



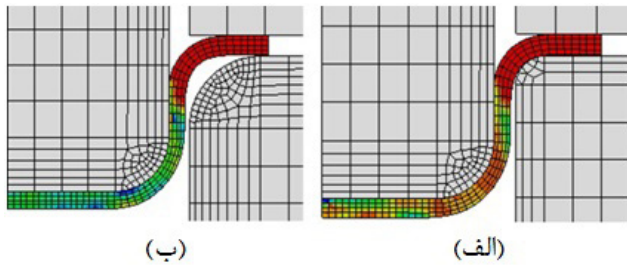
شکل ۶: نتایج شکل‌دهی در شعاع‌های گوشه مختلف

Fig6: Forming results at the different corner radii



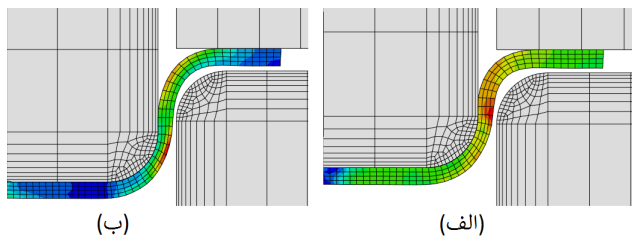
شکل ۱۰: نیروی بیشینه سنبه در شعاع‌های گوشه مختلف قالب و شعاع گوشه سنبه ۶ میلی‌متر، بدست آمده از شبیه‌سازی

Fig10: Maximum punch force at the different punch corner and die corner radius of 6 mm, obtained from the simulation



شکل ۱۱: تفاوت تماس ورق با قالب برای مدل‌های شبیه‌سازی شده در فشار سیال ۳۲ MPa در دو شعاع گوشه قالب: (الف) ۴ mm، (ب) ۸ mm

Fig11. Difference in the sheet-die contact condition for simulated models with medium pressure of 32 MPa at two die corner radii of (a) 4 mm and (b) 8 mm

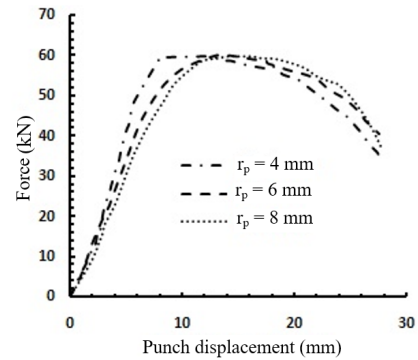


شکل ۱۲: تفاوت تماس ورق با قالب برای مدل‌های شبیه‌سازی شده در فشار سیال ۳۲ MPa در دو فشار شعاعی مختلف: (الف) با فشار شعاعی ۳۲ MPa، (ب) بدون فشار شعاعی

Fig12: Difference in the sheet-die contact condition for simulated models with medium pressure of 32 MPa at two different radial pressures of (a) 32 MPa and (b) without pressure

۵-۲- بررسی اثر دمای شکل‌دهی و سرعت سنبه بر فرآیند با روش تاگوچی

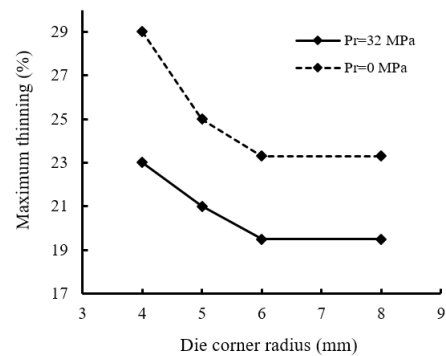
اثر دمای شکل‌دهی (T) و سرعت سنبه (PS) بر کمترین ضخامت ایجاد شده در قطعه در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است که بر طبق آن برای حالت هم‌دما افزایش دما از دمای ۳۰ °C تا ۲۱۰ °C باعث افت ناچیز در ضخامت قطعه‌کار می‌شود که این کاهش برای دمای ۲۱۰ °C



شکل ۸: نیروی سنبه در شعاع‌های گوشه مختلف سنبه و شعاع گوشه قالب ۶ میلی‌متری، بدست آمده از شبیه‌سازی

Fig8: Punch force at the different punch corner radii and die corner radius of 6 mm, obtained from the simulation

شکل ۹ نمودار درصد نازک‌شدگی بیشینه را در شعاع‌های گوشه مختلف قالب نشان می‌دهد. با افزایش این پارامتر تا ۶ میلی‌متر، به دلیل جریان بهتر ورق و نیز کاهش خمش بر روی این ناحیه، نازک‌شدگی بیشینه کاهش یافته است. با بررسی مقادیر بالاتر از ۶ میلی‌متر، تغییری در توزیع ضخامت مشاهده نشد. شکل ۱۰ تاثیر شعاع گوشه قالب را بر نیروی بیشینه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش این پارامتر تا ۶ میلی‌متر، نیروی بیشینه سنبه به دلیل جریان بهتر ورق برای ورود به محفظه قالب در حین شکل‌دهی کم شده و برای مقادیر بیشتر از آن، با توجه به شکل ۱۱ (عدم تماس ورق با ناحیه شعاع گوشه سنبه در مقادیر بالای آن) تغییر زیادی در نیروی بیشینه مشاهده نمی‌شود. با نتایج بدست آمده از شکل‌های ۹ و ۱۰، شعاع گوشه قالب ۶ میلی‌متر مناسب می‌باشد. در حالت بدون فشار شعاعی، در تمام شعاع‌های گوشه قالب مورد بررسی، درصد نازک‌شدگی بیشینه و نیروی سنبه بیشینه مطابق با شکل‌های ۹ و ۱۰ در مقایسه با حالت با فشار شعاعی افزایش می‌یابد. با این وجود، تغییرات ناچیز خروجی‌ها با تغییر شعاع گوشه قالب از ۶ به ۸ مشهود است. اگرچه مطابق با شکل ۱۲ که قالبی با شعاع گوشه ۶ میلی‌متر نشان می‌دهد، اعمال فشار شعاعی، انحنای ورق در ناحیه میلی‌متر شعاع گوشه قالب را افزایش داده و این ناحیه را از قالب دورتر می‌کند، بدون اعمال فشار شعاعی نیز تماسی با قالب رخ نمی‌دهد. از این رو، شعاع گوشه ۶ میلی‌متر مشابه با حالت با فشار شعاعی، مقداری مناسب برای قالب است.

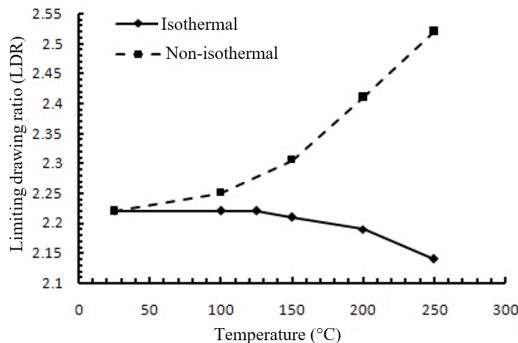


شکل ۹: درصد نازک‌شدگی بیشینه در شعاع‌های گوشه مختلف قالب و شعاع گوشه سنبه ۶ میلی‌متر، بدست آمده از شبیه‌سازی

Fig9: Maximum thinning percent at the different punch corner radii and die corner radius of 6 mm, obtained from the simulation

۵-۳- بررسی نسبت کشش حدی

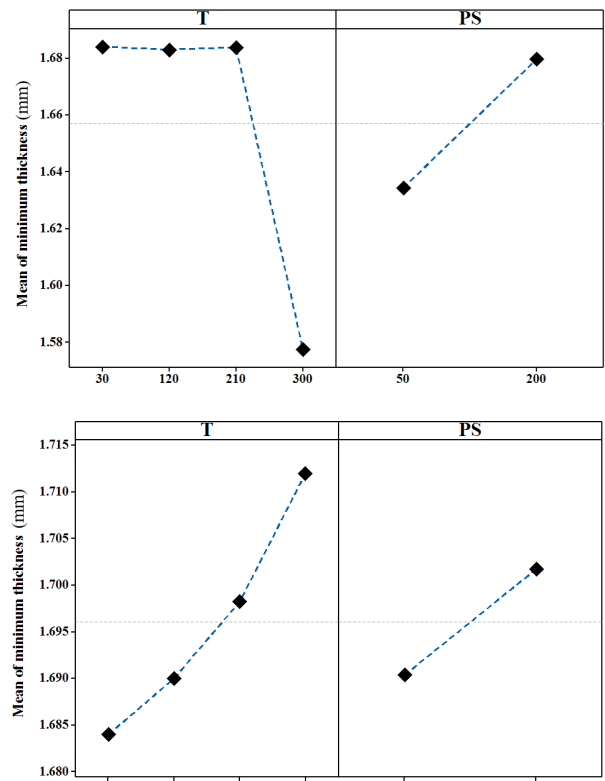
در این بخش به بررسی نسبت کشش حدی در دماهای مختلف شکل دهی در دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما و نیز در فشارهای مختلف سیال با استفاده از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. در حالت غیر هم‌دما، دمای 25°C برای سنبه در نظر گرفته شد. به همین دلیل، آن نواحی از ورق که در تماس با سنبه قرار دارند دارای دمای کمتری نسبت به نواحی دیگر می‌باشند که در این حالت، دما از مرکز قطعه به سمت نواحی بیرونی افزایش می‌یابد. بررسی‌ها با افزایش تدریجی ۱ میلی‌متر به قطر ورق برای هر دما انجام شد. قابل ذکر است که برای انجام این بررسی‌ها، از معیار حداکثر نازک‌شدگی و با مقدار حداکثر ۳۵ درصد استفاده شده‌است [۲۰]. شکل ۱۴ نسبت کشش در دماهای مختلف را در دو حالت هم‌دما و غیر هم‌دما نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده در این پژوهش حاکی از بهبود نسبت کشش حدی در حالت غیرهم‌دما با افزایش دمای سنبه است. در حالت غیر هم‌دما تا دمای 100°C افزایش قابل توجهی در نسبت کشش مشاهده نشده‌است. این نتیجه در تطابق با نمودار تنش- کرنش استحکام ماده است که در آن، از دمای محیط تا دمای 100°C تغییرات قابل ملاحظه‌ای اتفاق نمی‌افتد. با افزایش دما تا 250°C ، نسبت کشش حدی افزایش می‌یابد. این افزایش بدین جهت اتفاق می‌افتد که ناحیه بحرانی ورق (شعاع گوشه سنبه) به دلیل تماس با سنبه و انتقال حرارت با آن، در دمای پایین قرار دارد و در این ناحیه ماده دارای استحکام بالا است و بر خلاف آن، ناحیه فلنج و دیواره به دلیل گرم بودن، استحکام خود را از دست داده و جریان ماده راحت‌تر اتفاق می‌افتد. برای فهم بهتر این موضوع، توزیع دما در ورق در میانه فرآیند برای شکل دهی گرم غیر هم‌دما در دمای 200°C در شکل ۱۵ آورده شده‌است. با توجه به این توضیحات، بالاترین نسبت کشش حدی بدست آمده در این پژوهش $2/52$ مربوط به دمای 250°C می‌باشد. با توجه به شکل ۱۴، بررسی نسبت کشش در دماهای مختلف مربوط به حالت هم‌دما نشان می‌دهد که با افزایش دمای شکل دهی، نسبت کشش حدی کاهش یافته‌است. در این حالت دمایی، با توجه به ایجاد نازک‌شدگی بیشتر در ناحیه شعاع گوشه سنبه به‌خاطر کاهش استحکام ماده، پارگی زودتر ایجاد می‌شود و نسبت کشش حدی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴: نسبت کشش در دماهای مختلف، سرعت 50 mm/min و فشار 32 MPa بیشینه

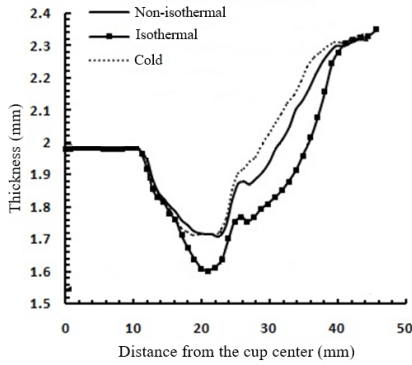
Fig14: Drawing ratio at the different temperatures, the speed of 50 mm/min and the pressure of 32 MPa

300°C چشمگیر است. این نتیجه حاکی از نرم شدن ماده مخصوصاً در ناحیه شعاع گوشه سنبه است که بیشترین کاهش ضخامت را دارد. از طرف دیگر، افزایش سرعت سنبه موجب بهبود محسوس ضخامت بحرانی شده که می‌تواند ناشی از تاثیر آن بر مسیر فشار اعمالی روغن زیر ورق و همچنین افزایش نرخ کرنش در ماده باشد. در حالتی که نرخ کرنش در ماده افزایش می‌یابد، ماده در مقابل تغییر شکل مقاوم‌تر شده و همین عامل می‌تواند نازک‌شدگی را به تاخیر بیندازد. بررسی تاثیر دما در حالت غیرهم‌دما نشان می‌دهد که با قرار دادن دمای سنبه برابر با 25°C ، افزایش دما امری مطلوب در افزایش ضخامت بحرانی است و در این حالت، شیب تغییرات ضخامت با افزایش دما بیشتر می‌شود. واضح است که بهترین دمای شکل دهی در این حالت، مقدار 300°C است. در این حالت نیز افزایش سرعت سنبه موجب بهبود شکل دهی می‌شود که نشان می‌دهد سرعت 200 mm/min بر دقیقه نسبت به سرعت 50 mm/min بر دقیقه نتایج بهتری را برای فرآیند کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی در هر دو حالت گرم هم‌دما و غیر هم‌دما در بردارد. همین نتایج برای حالتی که فشار شعاعی بر اطراف ورق اعمال نمی‌شود نیز صادق است. تفاوتی که وجود دارد این است که کمترین ضخامت قطعه‌کار در حالت بدون فشار شعاعی مقداری کمتر از حالت بررسی شده‌است.



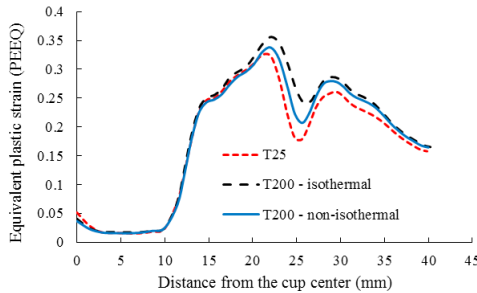
شکل ۱۳: میانگین اثر پارامترهای دما و سرعت بر کمترین ضخامت قطعه‌کار در حالت هم‌دما (بالا) و غیرهم‌دما (پایین)

Fig13: Mean effects of the temperature and speed parameters on minimum part thickness at isothermal (up) and non-isothermal (down) conditions



شکل ۱۷: نمودار توزیع ضخامت در سه حالت دمایی سرد، گرم هم‌دما و گرم غیر هم‌دما

Fig17: Thickness distribution diagram at the three conditions of cold, isothermal and non-isothermal warm forming

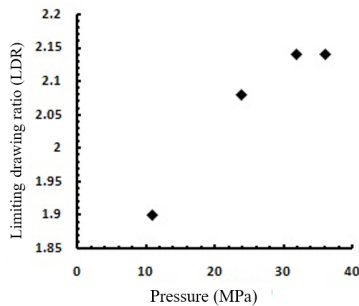


شکل ۱۸: مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل در راستای شعاعی برای سه

حالت شکل دهی سرد، گرم هم‌دما و غیر هم‌دما (دمای 200°C)

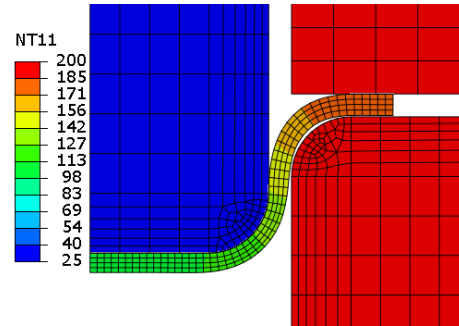
Fig18: Comparison of equivalent plastic stress distribution along the radial direction for the three conditions of cold, isothermal and non-isothermal warm forming (temperature of 200°C)

با مطالعه اثر فشار سیال (در سرعت 5° میلی‌متر بر دقیقه و دمای 200°C و حالت هم‌دما) بر روی نسبت کشش حدی، نمودار شکل ۱۹ بدست آمد. با افزایش فشار سیال به دلیل بالا رفتن سطح تماس ورق با سنبه، نیروی اصطکاک بین این دو افزایش می‌یابد. بالا رفتن نیروی اصطکاک سبب کاهش لغزش ورق بر روی سنبه و در پی آن کاهش کشش و نازک‌شدگی می‌شود که نتیجه آن افزایش نسبت کشش حدی با بالا رفتن فشار سیال می‌باشد. این افزایش نسبت کشش تا افزایش فشار خاصی ادامه پیدا کرده و از آن فشار بالاتر، تغییری در آن نسبت مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۹: تاثیر فشار سیال بر روی نسبت کشش حدی در حالت هم‌دما

Fig19: Effect of medium pressure on the limited drawing ratio at the isothermal warm condition

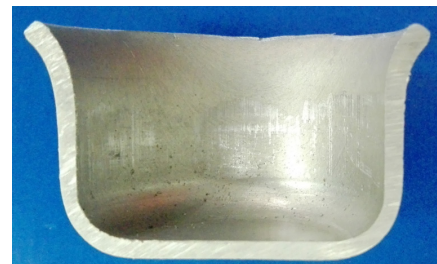


شکل ۱۵: توزیع دما در طول ورق در حالت شکل دهی گرم غیر هم‌دما و دمای

250°C

Fig15: Temperature distribution along the sheet at the non-isothermal condition and temperature of 250°C

یک نمونه از قطعه بدست آمده در شکل دهی گرم غیر هم‌دما در دمای 200°C در نسبت کشش ۲ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای مطالعه دقیق‌تر و مقایسه سه حالت دمایی سرد، گرم هم‌دما و گرم غیر هم‌دما، توزیع ضخامت در این سه حالت دمایی برای نسبت کشش ۲ به دست آمد که منحنی‌های شکل ۱۷ حاصل شد. مشاهده می‌شود که استفاده از سنبه سرد باعث کاهش نازک‌شدگی بیشینه نسبت به حالت گرم هم‌دما شده است. در واقع، افزایش دما (200°C) باعث کم شدن استحکام ورق و در نتیجه افزایش کشیدگی آن شده است. استفاده از سنبه سرد سبب انتقال حرارت زیاد بین ناحیه کف و ناحیه شعاع گوشه سنبه با سنبه سرد می‌شود. نتیجه این انتقال حرارت آن است که فلنج و دیواره در حالت گرم قرار داشته و بحرانی‌ترین ناحیه (شعاع گوشه سنبه) در حالت سرد قرار دارد و کشیدگی در این قسمت کم شده و در پی آن نازک‌شدگی بیشینه کاهش می‌یابد. مقایسه توزیع کرنش پلاستیک معادل^۱ در راستای شعاعی در میانه فرآیند برای سه حالت دمایی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، در شکل دهی گرم هم‌دما و شکل دهی سرد به ترتیب بیشترین و کمترین کرنش در قطعه اتفاق می‌افتد. بیشترین کرنش پلاستیک معادل در تمام حالت در ناحیه شعاع سنبه است که ناحیه بحرانی از منظر ضخامت است.

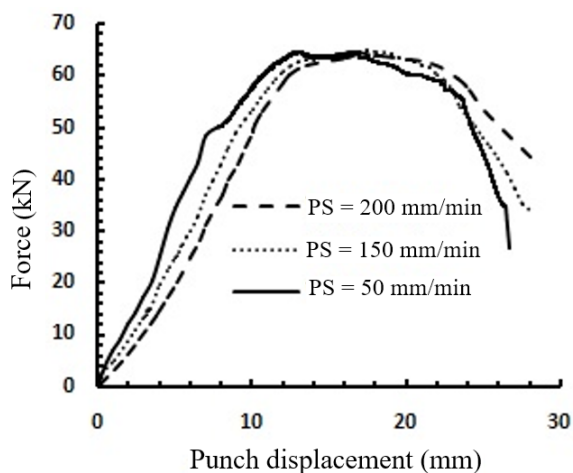


شکل ۱۶: نمونه‌ای از قطعه سالم بدست آمده (برش خورده) در شکل دهی

گرم غیر هم‌دما در نسبت کشش ۲ و دمای 200°C

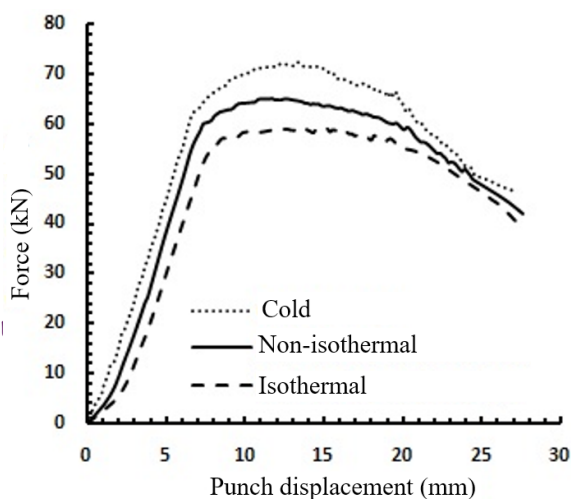
Fig16: A sample of obtained successfully formed part (cut) in the non-isothermal warm condition at the drawing ratio of 2 and the temperature of 200°C

1 Equivalent Plastic Strain (PEEQ)



شکل ۲۱: نیروی بیشینه در سرعت‌های مختلف در حالت گرم همدم (تجربی)

Fig21: Maximum force at different temperatures in the isothermal condition (empirical)



شکل ۲۲: نمودار نیروی سنبه در دمای محیط و دو حالت گرم (دمای ۲۵۰ °C) (تجربی)

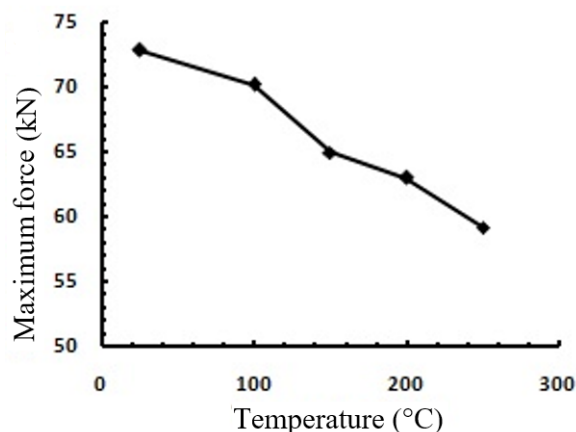
Fig22. The punch force diagram at the cold and the two warm conditions (250 °C) (empirical)

۶- نتیجه‌گیری

- بر اساس مطالعات انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر حاصل شد:
- با بررسی‌های انجام شده پیرامون تاثیر پارامترهای مختلف بر روی نسبت کشش حدی، این نتایج حاصل شد که در حالت غیر هم‌دم، افزایش دما، افزایش فشار سیال تا یک حد معین و نیز افزایش سرعت سنبه، نسبت کشش حدی را افزایش می‌دهند. در این حالت دمایی، نسبت کشش حدی به مقدار ۲/۵۲ در دمای ۲۵۰ °C می‌رسد. بالا رفتن دما در حالت هم‌دم، نتیجه‌ای عکس داشته و موجب کاهش نسبت کشش می‌شود.
- در شکل‌دهی گرم با استفاده از روش کشش عمیق هیدروآرگنیک با فشار شعاعی، استفاده از شرایط دمایی غیرهم‌دم (سنبه سرد) مناسب‌تر بوده

۵-۴- بررسی نیروی شکل‌دهی

شکل ۲۰، منحنی نیروی بیشینه سنبه بدست آمده از آزمایش را در دماهای مختلف شکل‌دهی نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودار، با افزایش دمای شکل‌دهی، به دلیل کم شدن استحکام ورق و کاهش تنش سیلان، نیروی بیشینه سنبه کاهش می‌یابد. نکته دیگری که در این نمودار مشاهده می‌شود کاهش بیشتر نیرو در دماهای بالاتر است. به طور مثال، با افزایش دما از ۲۵ °C تا ۱۰۰ °C، به مقدار ۳/۴ درصد کاهش نیرو بوجود می‌آید، در حالی که با افزایش دما از ۲۰۰ °C به ۲۵۰ °C، این کاهش به میزان ۶/۱۸ درصد است. با توجه به نمودار تنش-کرنش برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲، تاثیر تغییرات دمایی بر روی تنش در دماهای بالا بیشتر می‌باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده برای نیرو، با افزایش دما از ۲۵ °C به ۲۵۰ °C به میزان ۲۱ درصد کاهش نیرو ایجاد شده است.



شکل ۲۰: نیروی بیشینه در دماهای مختلف در حالت گرم همدم (تجربی) ۱

Fig20. Maximum force at different speeds in the isothermal warm condition (empirical)

شکل ۲۱ منحنی‌های نیروی سنبه در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد که با تغییر سرعت شکل‌دهی، نیروی بیشینه سنبه ثابت مانده است. دلیل این امر می‌تواند این باشد که در دمای بالا، به دلیل افزایش طول کشش در سرعت‌های پایین، ماده به کرنش‌های بیشتری می‌رسد و در نتیجه تنش بیشینه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش سرعت، نرخ کرنش و در پی آن تنش بیشینه افزایش می‌یابد. این دو عامل می‌تواند سبب یکسان بودن تنش بیشینه و در پی آن یکسان بودن نیروی سنبه بیشینه مورد نیاز برای شکل‌دهی باشد.

برای مقایسه نیروی شکل‌دهی در سه حالت دمایی محیط، گرم هم‌دم و گرم غیرهم‌دم، نمودار تجربی شکل ۲۲ حاصل شد که در آن مقادیر ۷۲، ۶۴ و ۵۸ کیلو نیوتن به ترتیب برای دمای محیط و شرایط دمایی گرم غیرهم‌دم و گرم هم‌دم بدست آمد. در حالت گرم هم‌دم، تمام نواحی گرم می‌باشند، در حالی که در حالت غیرهم‌دم تنها ناحیه فلنج و دیواره گرم می‌باشند. در نتیجه، حالت گرم هم‌دم به نیروی سنبه کمتری نیاز دارد.

- Machine Tools and Manufacture, 47(3) (2007) 436-443.
- [7] H.S. Kim, A combined FEA and design of experiments approach for the design and analysis of warm forming of aluminum sheet alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1-4) (2010) 1-14.
- [8] T. Naka, F. Yoshida, Deep drawability of type 5083 aluminium–magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed, *Journal of Materials Processing Technology*, 89 (1999) 19-23.
- [9] J. Xu, Y. Zhou, J. Cui, G. Sun, G. Li, Experimental study for rubber pad forming process of AZ31 magnesium alloy sheets at warm temperature, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(1) (2017) 1079-1087.
- [10] S. Thiruvarudchelvan, F. Travis, Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes—an appraisal, *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1) (2003) 70-75.
- [11] S.-H. Zhang, M.R. Jensen, K.B. Nielsen, J. Danckert, L. Lang, D. Kang, Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 142(2) (2003) 544-550.
- [12] D.-C. Kang, L.-H. Lang, S.-H. Zhang, Z.-R. Wang, S.-J. Yuan, Hydrodynamic deep drawing process, *Harbin Gongye Daxue Xuebao (Journal of Harbin Institute of Technology) (China)*, 32(5) (2000) 42-44.
- [13] L. Lang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1) (2004) 119-131.
- [14] H. Choi, M. Koç, J. Ni, A study on warm hydroforming of Al and Mg sheet materials: mechanism and proper temperature conditions, *Ann Arbor*, 1001 (2008) 48109-42136.
- [15] P. Groche, R. Huber, J. Doerr, D. Schmoekkel, Hydromechanical deep-drawing of aluminium-alloys at elevated temperatures, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(1) (2002) 215-218.

است، زیرا می‌توان علاوه بر رسیدن به مزیت کاهش نیرو با بالا رفتن دما، به نسبت کشش حدى بالاترى رسید.

- با افزایش شعاع گوشه سنبه تا یک مقدار معین، توزیع ضخامت بهبود می‌یابد، درحالی‌که تغییرات آن بر روی نیروی بیشینه سنبه تأثیری ندارد. همچنین، افزایش شعاع گوشه قالب تا یک مقدار معین، توزیع ضخامت بهتری را در پی داشته و نیروی سنبه نیز با زیاد شدن آن کاهش می‌یابد.
- با بررسی اثر دمای شکل‌دهی و سرعت سنبه بر کمترین ضخامت قطعه‌کار با استفاده از روش تاگوچی، مشخص شد که افزایش سرعت سنبه در هر دو حالت بهبود ضخامت را در پی دارد، حال آن‌که در حالت هم‌دما افزایش دما موجب کاهش ضخامت به‌خصوص در دمای 300°C می‌شود درحالی‌که در همین دما بهترین ضخامت برای حالت غیرهم‌دما به‌دست می‌آید.
- بررسی نیروی شکل‌دهی نشان داد که افزایش دما در حالت هم‌دما، موجب افت قابل ملاحظه نیروی شکل‌دهی می‌شود. تغییر سرعت در این حالت دمایی، اثری بر نیروی بیشینه سنبه ندارد. مقایسه حالات مختلف دمایی نشان داد که نیروی سنبه در حالت سرد، گرم غیر هم‌دما و گرم هم‌دما به ترتیب کاهش می‌یابد.

منابع

- [1] F. Chiara, M. Canova, A review of energy consumption, management, and recovery in automotive systems, with considerations of future trends, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(6) (2013) 914-936.
- [2] T.B. Abbott, Magnesium: industrial and research developments over the last 15 years, *Corrosion*, 71(2) (2014) 120-127.
- [3] J. Beddoes, M. Bibby, *Principles of metal manufacturing processes*, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [4] T. Naka, G. Torikai, R. Hino, F. Yoshida, The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminium–magnesium alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1) (2001) 648-653.
- [5] H. Wang, Y. Luo, P. Friedman, M. Chen, L. Gao, Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA 7075, *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, 22(1) (2012) 1-7.
- [6] Q.-F. Chang, D.-Y. Li, Y.-H. Peng, X.-Q. Zeng, Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet, *International Journal of*

- [18] S. Mahabunphachai, M. Koç, Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures, *Materials & Design*, 31(5) (2010) 2422-2434.
- [19] N. Abedrabbo, F. Pourboghrat, J. Carsley, Forming of aluminum alloys at elevated temperatures–Part 2: Numerical modeling and experimental verification, *International journal of plasticity*, 22(2) (2006) 342-373.
- [20] H.S. Kim, M. Koc, J. Ni, A. Ghosh, Finite element modeling and analysis of warm forming of aluminum alloys: Validation through comparisons with experiments and determination of a failure criterion, *Journal of manufacturing science and engineering*, 128(3) (2006) 613-621.
- [16] E. Khosrojerdi, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, S.J. Hosseinipour, Experimental and numerical analysis of hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure at elevated temperatures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2016) 1-11.
- [17] T. Naka, R. Hino, F. Yoshida, Deep drawability of 5083 Al-Mg alloy sheet at elevated temperature and its prediction, *Key Engineering Materials*, 177 (2000) 485-490.

