

توسعه تجربی شکل دهی انفجاری عدسی‌های لبه دار با استفاده از قالب نری

سعید برجی^{۱*}

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۸۸/۲/۷، تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۲۶)

چکیده

در این تحقیق توسعه تجربی روشی برای تهیه عدسی‌های لبه‌دار از ورق‌های آلومینیومی به روش شکل‌دهی انفجاری و با استفاده از قالب‌های نری ارائه و برای این کار ساخت افزاری طراحی و ساخته شد. درگام نخست پارامترهای اساسی شکل دهی انفجاری شامل مقدار خرج و فاصله استقرار خرج از ورق به روش تجربی تعیین گردید. بررسی‌ها نشان داد که بزرگتر کردن ابعاد ورق اولیه و محدود کردن حرکت لبه‌ی ورق با تکیه بر روی انحنای یک رینگ محیطی، شرایط شکل‌گیری عدسی را بهتر می‌کند و در این راستا توزیع کرنش در قطعات شکل داده شده نیز مطالعه گردید. نتایج آزمایشات نشان داد که ساخت عدسی‌های لبه‌دار از ورق‌های با ضخامت کم‌تر که بیشتر در معرض ناپایداری فشاری می‌باشند، با ایجاد شیاری در پیرامون کرده ورق اولیه به همراه افزایش قطر و محدود کردن حرکت لبه‌های ورق، ممکن می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شکل دهی انفجاری، قالب‌های نری، عدسی.

۱- مقدمه

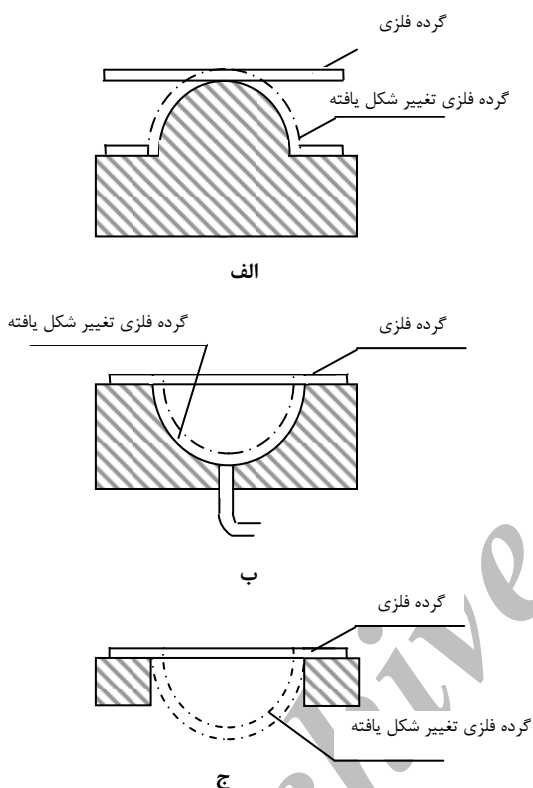
عبارت است از: قابلیت تولید محصولات با کیفیت بالا، تلرانس‌های بسته، شکل‌دهی مواد با استحکام بالا، برگشت ارتجاعی کم و قابلیت ایجاد شکل‌های پیچیده با ابعاد بزرگ [۵ و ۲].

سیستم شکل‌دهی انفجاری معمولاً شامل ماده منفجره، محیط انتقال انرژی، قطعه کار و در بیشتر موارد قالب است. معمولاً از مواد منفجره قوی به عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود [۶ و ۲]. محیط انتقال انرژی می‌تواند هوا، آب، پلاستیک، ژل و مواد دیگر باشد. آب معمول‌ترین واسطه انتقال انرژی انفجار به قطعه کار است ولی در قطعاتی که به دلیل محدودیت شکل هندسی

شکل‌دهی انفجاری از فرآیندهای شکل‌دهی سریع است که برای شکل دادن قطعات با شکل‌های پیچیده و مواد پراستحکام در صنایع هوا-فضا و صنایع سنگین مورد توجه بوده است و تحقیقات تجربی و نظری در این حوزه هنوز ادامه دارد [۴-۱]. با وجود آنکه کشف این روش به یکصد سال قبل باز می‌گردد اما اولین کاربردهای موفقیت‌آمیز و اقتصادی فرآیند شکل‌دهی انفجاری مربوط به دهه هفتاد است که روی قطعات بزرگ آلومینیومی و فولادی با استحکام بالا صورت گرفته است. مزایای این روش شکل‌دهی

* E-mail: borji.saeed@gmail.com

۳- سیستم قالب‌های نری، نیاز به حلقه فشار روی ورق (ورق گیر) ندارند. با توجه به آنکه پدیده ناپایداری فشاری در لبه‌های ورق که منجر به ایجاد چروک‌خوردگی در لبه‌های ورق می‌شود، مهم‌ترین محدودیت فرم‌گیری روی قالب نری محسوب می‌گردد، بنابراین شکل‌دهی انفجاری با استفاده از قالب‌های نری، بیشتر برای ساخت عدسی‌ها و نیمکره‌های با ضخامت بالا مناسب است.



شکل ۱- شماتیک انواع روش‌های شکل‌دهی گرده ورق به روش انفجاری. الف- قالب نری ب- قالب ماده بسته ج- شکل‌دهی روی رینگ [۴].

در شرایط شکل‌دهی متعارف در سرعت‌های پایین، و در محدوده نسبت قطر به ضخامت گرده ورق ۲۵ تا ۴۰، کشش عمیق بدون ورق‌گیر ممکن است و ورق صلبیت لازم برای جلوگیری از چین‌خوردگی را دارا می‌باشد [۱۷]. در این تحقیق، شکل‌دهی ورق‌های آلومینیومی از سری ۵۰۰۰ برای تهیه عدسی‌های لبه‌دار با استفاده از قالب نری و با نسبت قطر به ضخامت ورق اولیه از ۳۷/۵ تا حدود ۶۴ بدون ورق‌گیر مورد مطالعه قرار گرفته‌است. برای این منظور ابتدا پارامترهای اساسی از جمله مقدار ماده منفجره و فاصله استقرار ماده منفجره تا ورق به صورت تجربی بدست‌آمده، سپس تغییر ابعاد

فاصله‌ی خرج انفجاری از قطعه کار کم است، برای جلوگیری از افزایش سرعت قطعه‌کار فراتر از سرعت بحرانی از مواد دیگر استفاده می‌شود [۷ و ۸]. شکل‌دهی انفجاری روی آلیاژهای تیتانیوم، نیکل، آلومینیوم و فولادهای ضدزنگ معمول است. اخیراً یک گروه تحقیقاتی از هلند توانسته از این روش برای فرم‌دهی آلیاژهای سخت و شکننده PM1000 و کامپوزیت‌های فلزی حاوی رشته‌های شیشه نیز استفاده کند [۲]. شکل‌دهی انفجاری می‌تواند به صورت محصور (در قالب) و یا باز (بدون قالب) انجام شود [۹ و ۱۰].

شکل‌دهی انفجاری مخازن کروی بدون قالب پیشرفت مهمی است که در سالهای اخیر در زمینه شکل‌دهی انفجاری حاصل شده است و مزیت‌های فنی و اقتصادی شکل‌دهی انفجاری را توسعه داده است [۱۰ و ۱۱]. از سوی دیگر، شبیه‌سازی عددی فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری به عنوان ابزاری قوی در پیش‌بینی رفتار شکل‌گیری قطعه‌کار و بهینه‌سازی فرآیند در سال‌های اخیر توسعه و به‌کار گرفته شده است [۱۲ و ۱۳].

۲- شکل‌دهی انفجاری عدسی‌ها

از عدسی‌ها در ساخت مخازن تحت فشار استفاده می‌شود. به دلیل تقارن در شکل عدسی‌ها و نیمکره‌ها، شکل‌دهی انفجاری یکی از روش‌های مناسب جهت تولید آنها می‌باشد. شکل‌دهی از گرده ورق روی سنبه (قالب نری)، قالب ماده و یا رینگ که فقط لبه‌های ورق را نگه می‌دارد (شکل ۱) امکان‌پذیر است [۶]. اندازه‌کردن پیش‌شکل‌های جوش‌کاری شده به شکل و ابعاد نهایی در قالب برای دستیابی به نیمکره نیز گزارش شده‌است [۱۴]. تحقیقات زیادی در مورد فرم‌دهی عدسی‌ها و نیم‌کره‌ها با استفاده از قالب‌های مادگی و فرم‌دهی آزاد ورق بر روی حلقه انجام شده است [۱۵ و ۱۶]. در قالب‌های بسته هوای موجود در فضای میان ورق و قالب باید تخلیه شود؛ در غیر این صورت فشار و دمای هوای حبس شده بین قطعه و قالب در اثر تراکم آدیاباتیک به شدت افزایش می‌یابد و باعث برآمدگی و تاول زدن در قطعه کار می‌گردد. مشکل دیگری که در این نوع شکل‌دهی عدسی‌ها وجود دارد نازک شدن بیش از اندازه مرکز عدسی است [۱۶].

مزایای اشاره شده در منابع برای شکل‌دهی روی سنبه در مقایسه با قالب ماده عبارت است از:

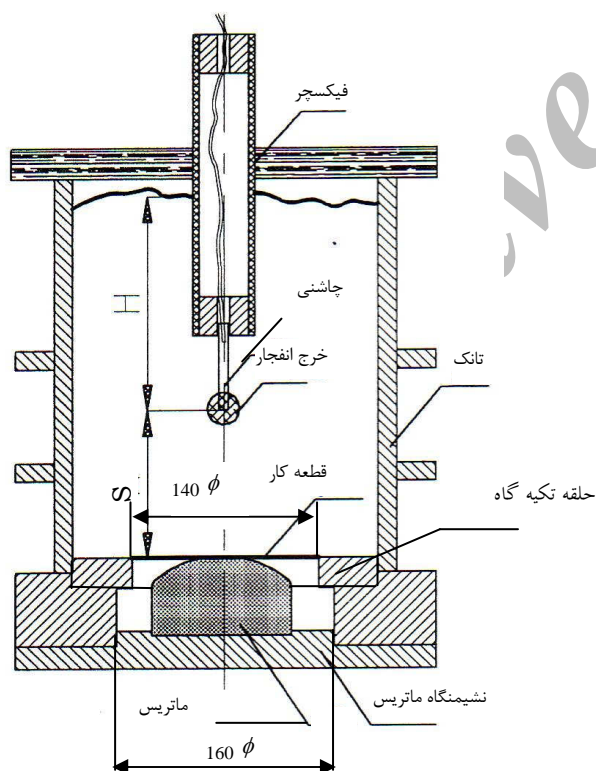
- ۱- در سیستم قالب‌های نری نیازی به ایجاد خلاء نیست.
- ۲- به دلیل ماهیت فشاری تنش‌ها، قالب‌های نری کمتر در معرض شکست قرار دارند.

گرده‌ها به شکل دایره در چهار گروه با مشخصاتی مطابق جدول (۲) تهیه شدند. در کناره گرده‌های مربوط به گروه ۴ به منظور حذف چروک خوردگی در لبه‌ی عدسی، مطابق شکل (۵) شیارهای محیطی به عرض ۳ میلی‌متر و عمق ۸ میلی‌متر ایجاد شد.

ماده منفجره مورد استفاده خمیر انفجاری C-4 بود که به راحتی با دست قابلیت شکل‌گیری داشته و به صورت کروی شکل داده می‌شد. این ماده منفجره جاذب آب نبوده و بدون داشتن ظرف مستقیماً در آب بکار گرفته شد. این خرج توسط چاشنی‌های الکتریکی شماره ۸ منفجر می‌گردید.

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق آلومینیوم ۵۰۸۳

مربوط به نقطه	تنش (مگاپاسکال)	کرنش (درصد)
تسلیم	۱۵۱	-
نهایی	۳۲۰	۳۰/۳
گسیختگی	۳۰۱	۳۱/۵



شکل ۳- شماتیک شکل دهی انفجاری با استفاده از محفظه جدار ضخیم با حلقه تکیه‌گاه.

گرده ورق، شکل گرده ورق و طراحی قالب برای رسیدن به نتیجه مطلوب بررسی شده است. همچنین توزیع کرنش در پوسته برای بررسی اثر این تغییرات مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳- تجهیزات و مواد

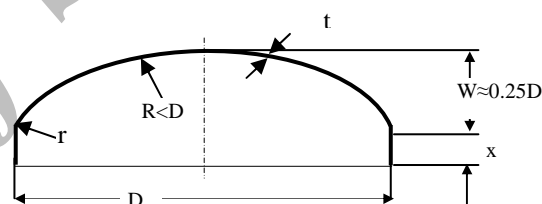
شکل مورد نظر برای شکل‌دهی، نزدیک به عدسی از نوع لبه‌دار ۲:۱ استاندارد ASME می‌باشد که طرح کلی آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در این تحقیق شعاع خم در محدوده ۲ تا ۳ برابر ضخامت قرارداد. ابعاد سنبه ساخته شده به شرح زیر می‌باشد:

D= ۹۰ میلی‌متر

R= ۵۲ میلی‌متر

r= ۵ میلی‌متر

x= ۵ میلی‌متر



شکل ۲- طرح عدسی لبه‌دار.

برای بررسی پارامترهای مختلف در شکل دادن عدسی‌ها از دستگاهی مطابق شکل (۳) استفاده شده است. در این دستگاه سنبه، شکل و ابعاد داخلی قطعه‌کار را ایجاد می‌کند و محفظه جدار ضخیم وظیفه‌ی نگهداری آب روی ورق را بعهده دارد. مزیت شایان ذکر استفاده از این محفظه این است که علاوه بر انرژی موج انفجار خرج، از اندازه حرکت آب نیز در شکل دادن ورق بهره گرفته می‌شود. در نتیجه ضمن آنکه مقدار خرج مورد نیاز کاهش می‌یابد، می‌توان از یک محفظه برای تعداد زیادی انفجار استفاده کرد. همچنین در تعدادی از آزمایش‌ها از یک حلقه‌ی خارجی که دیواره داخلی آن انحنای داده شده برای تکیه‌گاه لبه ورق استفاده گردید (شکل ۴).

گرده از ورق آلومینیومی ۵۰۸۳ در شرایط آنیل شده با مشخصات آمده در جدول (۱) که با انجام آزمون استاندارد کشش حاصل شده به روش برش و ماشین کاری آماده شد. باتوجه به آنکه هدف بدست آوردن عدسی‌های لبه‌دار با قطر نهایی داخلی ۹۰ میلی‌متر بود،

روی آرایش اولیه ای با گرده ورق به قطر ۱۲۰ میلی متر و ضخامت ۳/۲ میلی متر و بدون تکیه دادن لبه ورق روی حلقه تکیه گاه انجام گرفت. از این پس با ثابت نگه داشتن مقدار خرج و فاصله استقرار و ایجاد تغییراتی در طراحی گرده ورق و قالب دستیابی به شکل مطلوب میسر گردید.

جدول ۲- مشخصات هندسی نمونه های آزمایش.

گروه	قطر گرده (mm)	ضخامت (mm)
۱	۱۲۰	۳/۲
۲	۱۴۰	۳/۲
۳	۱۴۰	۲/۲
۴	۱۴۰	۲/۲

جهت اندازه گیری کرنش بر روی سطح نمونه ها، دایره متحدالمرکزی به فاصله ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد. در عمل با توجه به وجود تقارن به جای رسم دایره، دو قطر عمود بر هم با ماژیک رنگ ثابت روی گرده ورق رسم گردید و از مرکز به فواصل مساوی توسط پرگار و کولیس مدرج گردیدند با اندازه گیری فواصل این خطوط، قطر دایره ها قبل و بعد از شکل دهی بدست آمد و با استفاده از رابطه (۱) کرنش های محیطی محاسبه گردید.

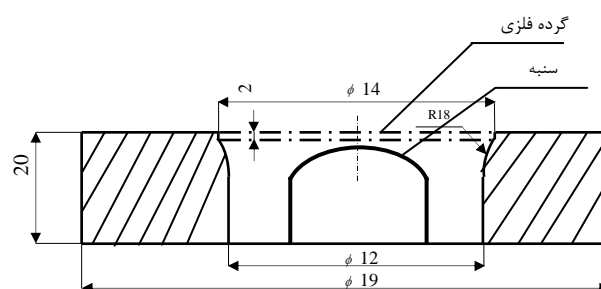
$$\varepsilon_{\theta} = \ln \frac{D}{D_0} \quad (1)$$

در این رابطه D_0 قطر هر یک از دایره ها قبل از فرم دهی، D قطر هر یک از دایره ها بعد از فرم دهی و ε_{θ} کرنش محیطی می باشد.

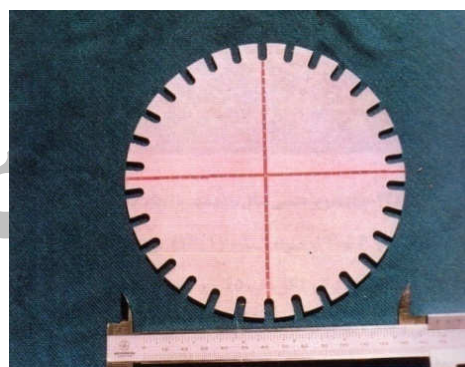
برای بدست آوردن کرنش در ضخامت ورق، نمونه ها بعد از شکل دهی برش داده شده و ضخامت در محل های مورد نظر توسط میکرومتر اندازه گیری شد و سپس کرنش در ضخامت به کمک رابطه (۲) محاسبه گردید. در این رابطه t و t_0 به ترتیب ضخامت های نهایی و اولیه ورق می باشد.

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2)$$

برای ارائه نتایج از کرنش های محاسبه شده که در برابر فاصله اولیه از مرکز ورق رسم شده است، استفاده گردیده است. البته لازم به توضیح است که رسم کرنش حداکثر تا فاصله ۶۰ میلی متری از مرکز انجام شده است زیرا ورق در شعاع های بیشتر از ۶۰ میلی متر در ناحیه چروک خورده و یا برش خورده قرار گرفته که امکان اندازه گیری وجود نداشته است. در بعضی موارد این مسئله حتی در شعاع ۶۰ میلی متر نیز صادق بوده و اطلاعات مربوط به این شعاع



شکل ۴- جزئیات حلقه تکیه گاه برای شکل دادن ورق.



شکل ۵- قطعه کار شیار زده شده جهت شکل دهی انفجاری.

۴- شرایط آزمایش و روش اندازه گیری کرنش ها

در دستگاهی مطابق شکل (۳) و با نمونه هایی مطابق جدول (۲) آزمایشات مختلفی انجام شد. با توجه به اینکه در مورد شکل دهی بر روی قالب های نری اطلاعاتی که معیاری محاسباتی یا تجربی برای انتخاب مقدار خرج انفجاری و فاصله استقرار آن بدهد در دسترس نبود آزمایشات اولیه ای به منظور بررسی اثر مقدار خرج و اثر فاصله استقرار صورت پذیرفت. فاصله استقرار از ۴۰ تا ۱۰۰ میلی متر و مقدار خرج ۳ تا ۱۰ گرم مورد بررسی قرار گرفت. معیار اصلی برای ارزیابی شرایط کاری متفاوت و پذیرش آن برای استفاده در آزمایشات بعدی میزان شکل گیری بیشتر لبه و همگنی ضخامت در ناحیه عدسی در نظر گرفته شد. این نتیجه حاصل شد که فاصله استقرار مواد منفجره از نمونه به میزان ۵۰ میلی متر و مقدار خرج برابر ۵ گرم شرایط مناسبی برای انجام آزمایشات است و مشاهده شد که نه تنها با افزایش مقدار خرج و یا کاهش فاصله استقرار آن از ورق، شرایط کرنش در لبه ها بهتر نشد بلکه ناهمگنی در ضخامت نیز تشدید گردید. ارتفاع آب بالای خرج ۳۰۰ میلی متر یعنی ۵ برابر فاصله استقرار خرج تا ورق، و کاملاً محافظه کارانه انتخاب گردید تا موج برگشتی از سطح آب اثری روی شکل گیری نداشته باشد. این آزمایشات بر

کرنشی محیطی حدود $13/2$ درصد باشد (با فرض ضخامت $3/2$ میلی‌متر ضخامت دیواره) تا بطور کامل روی بخش استوانه‌ای سنبه فرم گیرد. اندازه گیری‌ها نشان داد که میزان شکل‌گیری درکناره‌های ورق برای شکل‌دادن کامل لبه و به میزان محاسبه شده کافی نبوده و افزایش مقدار خرج از 5 گرم به 10 گرم نیز اثری در بهبود فرم‌گیری لبه‌ها نداشت، ضمن آنکه افزایش مقدار خرج باعث کاهش ضخامت و عدم یکنواختی آن در ناحیه وسط عدسی می‌شود. شکل (۶) قطعه شکل داده شده‌ای از این گروه آزمایشات را نشان می‌دهد.

۵-۲- گروه دوم

با توجه به نتایجی که از آزمایشات گروه ۱ حاصل گردید و مشاهده عدم شکل‌گیری لبه‌ی عدسی، قطرگرده ورق از 120 میلی‌متر به 140 میلی‌متر افزایش یافته و حلقه‌ای با انحنا داخلی مشخص جهت تکیه‌گاه کناره ورق در حین فرم‌گیری نیز به قالب اضافه گردید (شکل ۴). پس از انجام این تغییرات و انجام مجدد آزمایشات، مشاهده گردید که عدسی و لبه‌ی آن به خوبی روی سنبه و حلقه تکیه‌گاه شکل گرفته است. وجود تکیه‌گاهی صلب در زیرلبه‌ی ورق و فشار حاصل از انفجار در آب که روی ورق اعمال می‌گردد مانند ورق‌گیر در فرآیند کشش عمیق عمل کرده و از ایجاد چروک در لبه‌ی عدسی جلوگیری می‌کند. شکل (۷) نمونه فرم داده‌شده را قبل و بعد از پیرایش قسمت‌های اضافی نشان می‌دهد. توزیع کرنش محیطی و ضخامت این نمونه در شکل (۸) آمده است.



شکل ۷- تصویر عدسی‌های شکل داده شده از گرده به قطر 140 ، ضخامت $3/2$ میلی‌متر روی حلقه تکیه‌گاه، قبل و بعد از برش پیرامون.

نیامده است، اما به طور کلی سعی شده است که علی‌رغم عدم وجود دقت در کرنش‌های محاسبه شده در شعاع 60 میلی‌متر، اطلاعات مربوط به کرنش این نقطه برای مشخص نمودن سیر تغییرات آورده شود. در نهایت عدسی‌های شکل داده شده در شعاع اولیه 55 میلی‌متر بریده می‌شد و این نقطه انتهایی لبه در نظر گرفته شده است. در این حالت ارتفاع باقی مانده برای لبه حداقل 5 میلی‌متر می‌باشد. حداکثر اختلاف در کرنش ضخامت از مرکز عدسی تا لبه بریده شده که تقریباً منطبق بر شعاع 55 میلی‌متر روی گرده اولیه است، به عنوان معیاری برای ارزیابی همگنی ضخامت درقطعه نهایی مورد استفاده قرار گرفته شده است.

۵- نتایج و بحث

آزمایشات بر روی نمونه‌ها مطابق جدول (۲) انجام شد که نتایج هر گروه از نمونه‌ها به شرح ذیل می‌باشند:

۵-۱- گروه اول

در این مجموعه از آزمایشات مرکز گرده ورق بر روی سنبه تکیه داده شد و لبه‌ی ورق در هوا آزاد و بدون تکیه‌گاه بود. نتایج حاصل نشان داد که شکل‌گیری وسط عدسی به خوبی صورت پذیرفته، ولی در لبه‌ها چروکیدگی ایجاد شده بود. با محاسبه‌ی ساده می‌توان نشان داد که از فاصله بالاتر از شعاع 50 میلیمتری مرکز گرده ورق، لبه استوانه‌ای عدسی (فلنج) شکل می‌گیرد. قطر داخلی لبه در صورت فرم‌گیری کامل باید 90 میلی‌متر شود. در این صورت نقطه‌ای که در شعاع 55 میلیمتر از مرکز ورق قرار دارد باید دارای

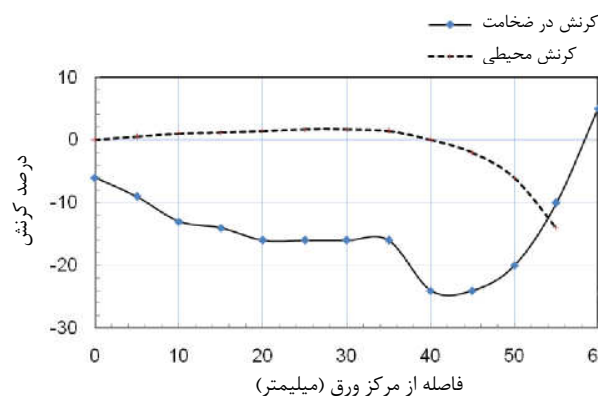


شکل ۶- تصویر عدسی‌های شکل داده شده از گرده به قطر 120 و ضخامت $3/2$ میلی‌متر بدون حلقه تکیه‌گاه.

میزان آن می باشد. دلیل این جابجایی، می تواند کشیده شدن بیشتر در ناحیه عدسی باشد، که حداقل ۹ درصد در ناحیه مرکز عدسی بوده و تا حدود ۱۵ درصد در نزدیکی ناحیه خم می رسد.



شکل ۸- توزیع کرنش محیطی و ضخامتی در نمونه تولید شده مربوط به گروه دوم.



شکل ۹- توزیع کرنش محیطی و ضخامتی در نمونه تولید شده مربوط به گروه دوم.

همان طور که مشاهده می شود حداکثر نازک شدگی که ناشی از خمش ورق است، در فاصله ۴۰ تا ۵۰ میلی متری از مرکز ورق و روی شانه‌ی سنبه که دارای شعاع انحنا ۵ میلی متری است، به میزان ۲۵ درصد اتفاق می افتد. لازم به ذکر است که بالا بودن نسبت ضخامت ورق به شعاع خم، باعث ایجاد نازک شدگی زیادی در این ناحیه شده است. حداقل نازک شدگی در مرکز و به مقدار ۵ درصد است که به دلیل ایجاد کشش دو محوری در ناحیه عدسی روی داده است. اختلاف در کرنش ضخامتی در طول شعاع به میزان حداکثر ۲۰ درصد، برای این عمق از کشش مزیت آشکار این روش را نسبت به کشش در قالب های ماده یا کشش روی رینگ که نازک شدگی حداقل ۳۰ درصدی در ناحیه مرکز را به همراه دارد، نشان می دهد [۱۶]. به طور کلی یکی از مشکلات شکل دهی ورق ها در قالب های ماده، نازک شدگی شدید و یا پارگی در مرکز عدسی است.

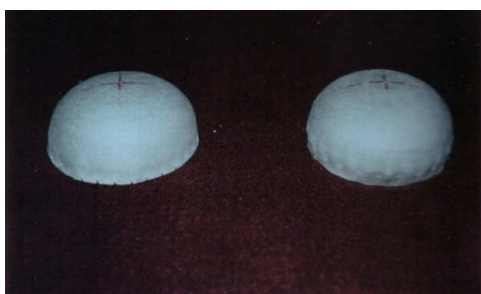
۳-۵- گروه سوم

با توجه به ثابت بودن حجم در تغییر شکل پلاستیک که ایجاب می کند مجموع کرنش های پلاستیک در هر المان صفر باشد و با توجه به شکل (۱۰) که نشان می دهد کرنش محیطی در ناحیه عدسی تقریباً صفر است، می توان نتیجه گرفت که قدر مطلق کرنش شعاعی برابر با کرنش در ضخامت بوده و در محدوده ۹ تا ۱۵ درصد قرار دارد. این مقدار کرنش شعاعی در فاصله ۴۰ تا ۵۰ میلی متری از مرکز ورق، حدود ۵ میلی متر افزایش در طول شعاع ایجاد می کند و باعث می گردد که ناحیه ی خم به شعاع اولیه ی کوچکتری انتقال یابد. افزایش قطر گرده ورق و همچنین حرکت لبه ورق روی انحنا ی حلقه تکیه گاه که ایجاد اصطکاک کرده و مقاومت بیشتری را در برابر کشیده شدن به داخل از خود نشان می دهد، باعث می شود که تنش کششی در ناحیه وسط

ضخامت گرده اولیه ورق در این مجموعه آزمایشات از ۳/۲ میلی متر به ۲/۲ میلی متر کاهش یافت ولی سایر شرایط ثابت باقی ماند. قسمت مرکزی عدسی و لبه ای به ارتفاع ۵ میلی متر به طور کامل روی سنبه شکل گرفت اما کناره ی ورق دارای چروک خوردگی بود. هر چند شکل گیری عدسی و لبه انجام شده است ولی ایجاد چروک در کناره های ورق خطر توسعه آن به سمت مرکز قطعه کار را با خود داشته و تکرار پذیری فرآیند را تحت الشعاع قرار می دهد. شکل (۹) عدسی شکل داده شده ی این گروه را قبل و بعد از پیرایش لبه ها نشان می دهد و شکل (۱۰) توزیع کرنش محیطی و ضخامتی این نمونه را نشان می دهد. نکته قابل توجه در این نمونه ها جابجا شدن محل حداکثر نازک شدگی خمشی به ناحیه میان شعاع اولیه ۳۵ تا ۴۰ میلی متر و کاهش

پارامترهای آزمایش یعنی مقدار خرج و فاصله استقرار خرج ثابت بدون تغییر ماند. شکل (۱۱) قطعه شکل‌داده شده از گرده‌ای با ۶ شیار را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به علت تعداد کم شیارها و فاصله نسبتاً زیاد آنها از یکدیگر، عمق چروک‌ها نسبت به حالت بدون شیار افزایش چشمگیری داشته، اما در عوض توزیع و شکل آنها منظم‌تر شده است. با افزایش تعداد شیارها مشاهده شد که شرایط شکل‌گیری نمونه‌ها در لبه‌های ورق بهبود یافته و همزمان با کاهش عمق چروک‌ها، انتشار چروک‌ها از کناره‌ی ورق به نواحی داخلی نیز بصورت کامل کنترل گردیده است. در شکل (۱۲) قطعات فرم داده‌شده با تعداد ۲۴ شیار (سمت راست) و ۳۰ شیار (سمت چپ) مشاهده می‌شود. در شکل (۱۳) توزیع کرنش محیطی و ضخامت نمونه با ۱۲ شیار نشان داده شده‌است همانطور که ملاحظه می‌شود، ضخامت نسبت به نمونه‌ی بدون شیار (شکل ۸) یکنواخت‌تر بوده و اختلاف کرنش در امتداد شعاع حداکثر ۱۰ درصد است.

در ناحیه‌ی خم و ناحیه عدسی، کرنش‌ها نسبت به گروه سوم تغییرچندانی نشان نمی‌دهد که نشانگر این است که با وجود شیارها در کناره‌ی گرده‌ی ورق کشش کافی در وسط ورق برای شکل‌گیری نیز ایجاد می‌شود.



شکل ۱۲- عدسی‌های شکل‌داده‌شده از گرده ورق شیار دار با قطر ۱۴۰ و ضخامت ۲/۲ میلی‌متر شکل سمت راست ۲۴ شیار، سمت چپ ۳۰ شیار.

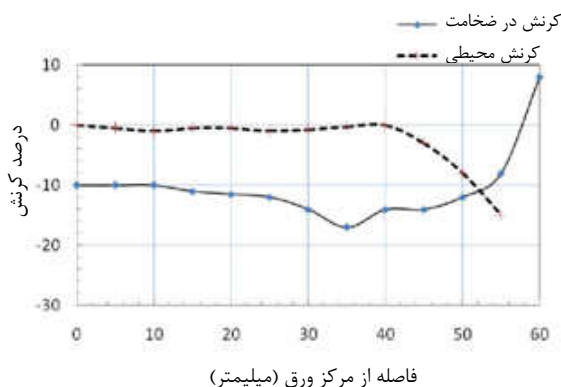
ورق افزایش یابد. کاهش اختلاف در میزان کرنش ضخامت در راستای شعاع عدسی شکل داده شده و همچنین کاهش نازک‌شدگی محل خم، بخشی به دلیل کاهش نسبت ضخامت به شعاع خم و بخشی نیز به دلیل کرنش ضخامت بیشتر (نازک شدن بیشتر) در ناحیه‌ی وسط عدسی می‌باشد. حداکثر اختلاف کرنش در ضخامت عدسی ۱۳ درصد است که نسبت به عدسی‌های شکل داده شده در گروه دوم کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. کرنش ضخامت در لبه که روی منحنی مربوط به شعاع ۵۵ میلی‌متر است، ۵٪ و در ناحیه خم که حدود شعاع ۳۵ میلی‌متر از مرکز قرار دارد، به میزان ۱۸٪- است.

۴-۵- گروه چهارم

برای حذف چروک خوردگی‌هایی که در کناره‌های ورق در آزمایشات مرحله‌ی سوم بوجود می‌آمد، تغییراتی در گرده ورق اولیه داده شد، به این ترتیب که در کناره‌های گرده‌ی ورق و در ناحیه‌ای که نهایتاً بعد از شکل‌دهی بریده می‌شود، شیارهایی ایجاد گردید (شکل ۵). در این گروه از آزمایشات اثر افزایش تعداد شیارها از ۶ تا ۳۰ عدد مورد مطالعه قرار گرفت و بقیه



شکل ۱۱- نمونه شکل‌داده شده با شش شیار محیطی، قطر ۱۴۰ و ضخامت ۲/۲ میلی‌متر.



شکل ۱۳- توزیع کرنش در عدسی شکل‌داده‌شده از ورق با ۱۲ شیار.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عدسی‌هایی از جنس آلومینیوم ۵۰۸۳ با لبه‌ای به موازات محور تقارن، به روش شکل‌دهی انفجاری روی سنبه (قالب نری) تولید شد. مشاهده گردید که مشکل اساسی در این روش، شکل‌گیری لبه‌های عدسی است که به دو صورت فرم‌گیری ناقص یعنی عدم انجام کرنش کافی برای رسیدن به قطر مطلوب و نیز چروک‌خوردگی ظاهر می‌گردد. در آزمایشاتی که لبه‌ی ورق آزاد و بدون تکیه‌گاه بود، مشکل ایجاد چروک در کناره‌ی ورق و عدم شکل‌گیری کامل لبه‌ها با افزایش مقدار ماده منفجره و یا تغییر فاصله استقرار قابل‌حل نبوده و منجر به بروز مشکلات دیگری مانند ناهمگنی بیشتر در ضخامت قطعه‌کار می‌گردید. نشان داده شده که ایجاد تکیه‌گاهی برای کناره‌ی ورق و افزایش قطر گرده‌ی ورق، می‌تواند راه‌حلی برای این مشکل باشد. استفاده از این تغییرات در مورد گرده ورق‌هایی با نسبت قطر به ضخامت کمتر (ضخامت ۳/۲ و قطر ۱۴۰ میلی‌متر و نسبت قطر به ضخامت ۳۷)، شکل‌گیری کامل و بدون مشکل عدسی و لبه آن را به‌همراه داشت. برای گرده ورق‌های نازک‌تر (ضخامت ۲/۲ و قطر ۱۴۰ میلی‌متر و نسبت قطر به ضخامت ۶۴)، با افزایش نسبت قطر ورق به ضخامت به دلیل کاهش صلیبت، ناپایداری خمشی که به شکل چروک در لبه‌های ورق ظاهر می‌شود، مشکل سازتر است. در این حالت ایجاد شیار در پیرامون گرده‌ی ورق و استفاده از حلقه‌ی تکیه‌گاه لبه، مشکل ایجاد چروک در لبه‌ی عدسی و توسعه آن به نواحی داخلی را حل کرد، و نهایتاً تهیه عدسی‌های لبه‌دار با کیفیت مطلوب را میسر ساخت. با ایجاد شیار در لبه‌ی ورق، آزادی بیشتری در تغییر فرم محیطی پیدا می‌شود که به شکل‌گیری بهتر لبه‌ها و پیشگیری از ایجاد و توسعه چروک به ناحیه عدسی کمک می‌کند. مطالعه توزیع کرنش‌های ضخامتی در قطعه‌های شکل داده‌شده نشان می‌دهد که در شکل‌دهی روی سنبه برخلاف روش فرم‌دهی روی قالب‌های ماده که نازک شدن شدید در ضخامت ورق در مرکز عدسی رخ می‌دهد، حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه خم میان لبه و عدسی بوده و توزیع کرنش ضخامتی همگن‌تری در کل قطعه وجود دارد. بیشترین یکنواختی ضخامت عدسی در روشی که شیارهایی در پیرامون گرده ورق ایجاد شده بود، مشاهده گردید.

مراجع

- [1]. Mynors, D. J.; Zhang, B. "Applications and Capabilities of Explosive Forming."; Journal of Material Processing Technology. 2002, 125-126, 1-25.
- [2]. White, T. "Explosive Forming."; 3rd Annual KU Aerospace Materials and Processes Conference, the University of Kansas, October 22nd, 2003.
- [3]. بیسادی. حسین، مهمان نواز. حسین، تحلیل تئوری و عددی صفحات غیر هم جنس تحت اثر شکل‌دهی انفجاری، مجله علمی و پژوهشی مواد پرانرژی؛ سال دوم، شماره ۱، ۱۳۸۶.
- [4]. جابور. داریوش، تحلیل شکل دادن انفجاری مخروط با لحاظ تغییرات ضخامت جداره محصول؛ مجله علمی و پژوهشی مواد پرانرژی، سال اول شماره ۲، ۱۳۸۵.
- [5]. Stuivinga, M.; van Doormaal, A., "Explosive Forming, an Enabling Technology."; 6th International Conference on Sheet Metal; University of Twente, The Netherlands, 1998.
- [6]. Ezra, A. A., "Principles and Practice of Explosive Metal working."; 1973, 1, 35-37.
- [7]. Neubauer A. "New Processes for Explosive Metal Forming of Sheet Parts in Batch Production."; Advanced Technology of Plasticity. 1998, 1, 379-384.
- [8]. Chatterjee, S.; Travis, F. M. "Effect of Varying Work Piece Thickness on the Energy Transfer and Further Considerations in the Use of Vacuum Chest in the Explosive Forming of Metals."; Advances in Machine Tools Design and Research. 1970, b, 901.
- [9]. Blazynski, T. Z. "Experimental and Theoretical Development of the High Energy Rate forming Processes."; The Engineer, 26 June, 1964, 1117-1124.
- [10]. Zehang, Ruj; Zehung, Tie-Sheng "Non-Die Explosive Forming of Spherical Pressure Vessel."; J. Mater. Process. Technol. 1994, 4, 341-347.
- [11]. Zehang, Ruj; Iyama, Hirifumi; Fujita, Masahiro; Zehung, Tie-Sheng "Optimum Structure Design Method of Non-Die Explosive Forming of Spherical Vessel Technology."; J. Mater. Process Technol. 1999, 85, 217-219.
- [12]. لاهوتی. احمد؛ شبیه سازی شکل‌دهی انفجاری استوانه‌های جدار نازک پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.
- [13]. مهدی پور. محمد رضا، شبیه سازی شکل‌دهی انفجاری پوسته ترانسفورمر پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیر، ۱۳۸۲.
- [14]. Blazinski, T. Z. "Explosive Welding, Forming and Compaction."; Chapter 9, Applied Science Publishers LTD. 1983.
- [15]. Altung, L.; Vail-Colorado "Explosive Forming of Domes."; Proc. 3th Intl. Conf. Center of High Energy Forming, 1971.
- [16]. Behave, T.; Mirsa, S.; Banerjee, J.; "Explosive Forming With Parabolic Dies."; Indian Journal of Technology. 1977, 15, 116-125.
- [17]. Kurt, Lange "Handbook of Metal forming."; SME, 1985, 20-43.