

تحلیل تجربی و عددی اثر همسانگردی و ناهمسانگردی ورق فلزی بر فرآیند شکل دهی استوانه برنجی

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

رامین خامدی*
سعید موحدیان

چکیده

هدف اصلی این پژوهش آزمون تجربی و مدل سازی عددی فرآیند شکل دهی استوانه برنجی CuZn30 طی سه مرحله کشش عمیق و اتوکاری دیواره و دو مرحله آنیل می باشد. به منظور تعیین شکل و اندازه دانه ها، قبل و بعد از فرآیندهای عملیات حرارتی، متالوگرافی بر روی سطح بدنه پوسته کشش و اتوکاری شده، انجام شده و طی آن تأثیر کارسختی بر تغییر استحکام تسلیم ماده مشخص شده است. مدل سازی عددی مراحل مختلف شکل دهی با روش اجزا محدود، انجام شده اند. هدف از مدل سازی عددی تعیین تأثیر پارامترهایی مثل ضریب اصطکاک، نمای کارسختی و ناهمسانگردی ورق اولیه بر نسبت کشش حدی، نیروی وارد بر سنبه و ابعاد نهایی قطعه، می باشد. نتایج نشان می دهند که تغییر ضریب اصطکاک بر توزیع کرنش موثر تأثیرگذار است درحالی که نمای کارسختی تأثیر ناچیزی بر توزیع کرنش موثر دارد. تغییر نمای کارسختی، نیروی وارد بر سنبه کشش را تحت تأثیر قرار می دهد. برخی عیب های ایجاد شده در نمونه های تجربی، طی تحلیل های نرم افزاری بررسی و علت بروز عیب ها مشخص شده و در آزمون های تجربی مورد استفاده قرار گرفتند. هندسه به دست آمده از تحلیل های نرم افزاری با آزمون های تجربی مقایسه و صحت سنجی شده اند.

واژه های کلیدی: شبیه سازی اجزا محدود، کشش عمیق، اتوکاری، کار سختی، نیروی کشش، گوش دار شدن.

Experimental and Numerical analysis of influence of isotropic and Anisotropic brass sheet metal properties on ironing process

R. Khamedi

Mechanical engineering department University of Zanjan. Zanjan, Iran

S. Movahedian

Mechanical engineering department, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

The main objective of this study is experimental tests and numerical modeling of forming and annealing processes of CuZn30 brass cylinder. In order to determine the grain size and shape, before and after heat treatment processes, metallography is conducted on the surface of the cylinder and during that, the impact of work hardening to change of the material yield strength, specified. Numerical Modelling of forming stages, have been conducted with the finite element method. The purpose of numerical simulation is to determine the effects of parameters such as friction coefficient, work hardening and anisotropic properties of primary sheet metal on limiting drawing ratio, force exerted on the drawing punch and final geometry. The results show that the friction coefficient have influence on the effective strain distribution, while work hardening exponent have little effect. Force exerted on the drawing punch is affected by changing the work hardening exponent. Some defects are caused in experimental samples, was analyzed by finite element method and the causes of appearing defects identified and were used in experimental tests. On the end, geometries obtained using simulations have been compared and verified with experimental tests. The output results show good agreement with experimental tests.

Keywords: Finite element simulation, Deep drawing, Ironing, Work hardening, Drawing force, Earing.

این روش ها در صنایع مختلف می باشد. دنا ف و همکاران در زمینه مکانیزم های تغییر شکل مواد با ساختار کریستالی FCC کار کردند و به این نتیجه رسیدند که برنج با هر دو مکانیزم لغزش و دوقلویی تغییر شکل می دهد اما به دلیل کم بودن انرژی فعال سازی دوقلویی، در مواد با SFE پایین، دوقلویی مکانیکی به لغزش مقدم است [۳]. باودین و همکاران، هوفیر و همکاران به این نتیجه رسیدند که در طول آنیل تبلور مجدد دوقلویی ها ریز ساختار سطح را تحت تأثیر قرار می دهند [۴، ۵]. برخی محققین نیز تأثیر پارامترهای فرآیند را بر تنش های پسماند بررسی کردند [۶]. لنگ و بروکر [۷] تأثیر شعاع لبه سنبه را بر تنش های پسماند بررسی و مشاهده کردند که کاهش لقی بین ابزارها باعث ایجاد فرآیند اتوکاری همزمان با کشش عمیق شده که منجر به کاهش زیادی در مقادیر تنشهای پسماند می شود.

۱- مقدمه

فرآیندهای شکل دهی جزو تکنولوژی های مدرن در مهندسی مکانیک محسوب می شوند. طی فرآیندهای شکل دهی، در اثر اعمال نیروی خارجی، ماده تغییر شکل پلاستیک داده و همین طور خواص مکانیکی ماده نیز تغییر می کند [۱]. ورق برنجی CuZn30 که با نام برنج آلفا نیز شناخته می شود، قابلیت شکل دهی سرد بسیار بالایی دارد و نسبت به برنج های با درصدروی بیشتر، مقاومت به خوردگی بیشتری دارد و مناسب ترین ماده برای فرآیند کشش عمیق و اتوکاری می باشد [۲].

پژوهش های بسیاری توسط محققین بر روی این ماده و فرآیند کشش عمیق و اتوکاری انجام شده است که نشان دهنده کاربرد بسیار

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: khamedi@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۰۷

برنجی مش زده شده و به منظور تحلیل برگشت فنی و تنش های پسماند، نوع قطعه الاستیک-پلاستیک تعیین شده است.

جدول ۱- درصد کاهش ضخامت، درصد تغییر شکل پلاستیک و نسبت کشش حدی در مراحل مختلف شکل دهی

نام مراحل	درصد کاهش ضخامت	درجه تغییر شکل اصلی (%)	نسبت کشش حدی
کشش اول	۴۶	۶۲	۱/۳۸
کشش دوم	۷۷	۱۵۴	۱/۲۰
کشش سوم	۲۵	۳۹	۱/۱۱

جدول ۲- متوسط مقادیر سختی دیواره در مراحل مختلف شکل دهی استوانه برنجی

نام مراحل	سختی دیواره قبل از آنیل (HV)	سختی دیواره بعد از آنیل (HV)
کشش اول	۱۷۷/۵۸	۶۳/۸۰
کشش دوم	۲۱۰/۶۰	در این مرحله آنیل انجام نشده
کشش سوم	۲۳۴/۷۵	۱۲۴/۳۵

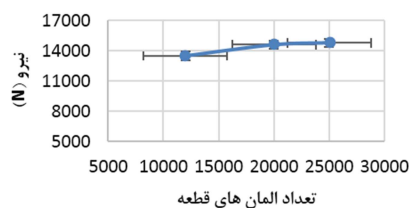
جدول ۳- خواص مکانیکی بدست آمده از آزمون کشش ورق برنجی CuZn30

ماده	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام برشی (MPa)	حداقل افزایش طول %
CuZn30	۳۳۸	۱۱۷	۲۳۴	۵۷

جدول ۴۴- ترکیب شیمیایی بدست آمده از آزمون کوانتومتری ورق برنجی CuZn30

ماده	% Fe	% S	% P	% Mn	% Zn	% Cu
CuZn30	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۵	۲۹	۷۰

بمنظور مش زنی ورق اولیه، کوچکترین بعد هندسی ابزار که این کوچکترین بعد در این تحلیل ها در قسمت شعاع لبه می باشد، اندازه گرفته شده و حداقل نصف این مقدار برای کوچکترین المان در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از نتایج تحلیل های عددی، مرحله اول شکل دهی با سه گروه تعداد المان انجام شد که طی آن در تعداد المان های بالای ۲۰ هزار المان، تغییر ناچیزی در نتایج دیده شد که نمودار المان- همگرایی در شکل ۱ آورده شده است. در تحلیل های نرم افزاری برای کسب دقت بیشتر و برای به دست آوردن نتایج دقیق، دستور مش بندی مجدد تعریف شده است.



شکل ۱- نمودار المان- همگرایی

در این پژوهش برای تولید پوسته استوانه ای برنجی CuZn30 از فرآیند کشش و اتوکاری دیواره به صورت سرد استفاده شده است. از مزایای کشش و اتوکاری می توان به سادگی ماشین آلات و ابزارهای مورد استفاده و همین طور کیفیت سطح و خواص مکانیکی بالای محصول نهایی اشاره کرد. انجام عملیات حرارتی منجر به آزاد شدن تنش های پسماند ناشی شکل دهی مرحله قبل شده و همچنین سختی قطعه را کاهش می دهد تا در مراحل بعدی پارگی در دیواره، مخصوصاً در نزدیکی لبه که بیشترین کارسختی در این منطقه ایجاد شده، رخ ندهد. خواص ماده در دو حالت همسانگرد و ناهمسانگرد مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر تغییر نمای کارسختی بر نیروی وارد بر سنبه کشش و توزیع کرنش موثر مورد بررسی قرار گرفته است و همین طور تأثیر تغییر اصطکاک داخلی و خارجی قطعه بر نسبت کشش حدی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- آزمون تجربی و مدل اجزا محدود

در این پژوهش، مراحل کشش و اتوکاری توسط دو حلقه ماتریس که به وسیله حلقه واسطه از هم جدا شده اند، انجام شده است. برای تولید قطعاتی با عمق زیاد معمولاً ابتدا شکل اولیه قطعه طی کشش عمیق و بازکشش ایجاد شده و سپس در قالب های اتوکاری در یک یا چند ایستگاه به ابعاد نهایی مورد نظر رسانده می شود [۸]. در این پژوهش با توجه به قابلیت بالای شکل دهی سرد ورق برنجی CuZn30، در مرحله اول، کشش و اتوکاری به طور همزمان در یک قالب انجام شده و به همین دلیل درصد کاهش ضخامت کمتر از حداکثر مقدار مجاز در نظر گرفته شده است. در آزمون های تجربی از ورق برنجی به ضخامت ۳/۲۵ میلی متر استفاده شده است.

از آنجایی که دانه های قطعه بعد از مراحل شکل دهی، تغییر شکل پلاستیک داده اند، آنیل تبلور مجدد برای بازیابی ریز ساختار انجام شده است. قبل از انجام آنیل، قطعات شسته شده و چربی زدایی شده اند و سپس کاملاً خشک شده و در ادامه به مدت ۱/۵ ساعت پیش گرم شده اند. آنیل کامل بعد از کشش اول، در دمای ۷۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت انجام شد. فرآیند عملیات حرارتی مرحله دوم در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ ساعت انجام شده است.

درصد کاهش ضخامت و درصد تغییر شکل پلاستیک و متوسط مقادیر سختی دیواره در مراحل مختلف شکل دهی، در جدول ۱ و ۲ آورده شده اند. با مقایسه مقادیر درصد کاهش ضخامت و درصد تغییر شکل پلاستیک با مقادیر سختی، به این نتیجه می رسیم که با افزایش درصد کاهش ضخامت و تغییر فرم پلاستیک، سختی قطعه به دلیل کارسختی بیشتر، افزایش می یابد.

به منظور تعریف خواص مواد در تحلیل های نرم افزاری آزمون سختی سنجی ویکرز و آزمون کشش انجام شد که نتایج در جدول ۳ آورده شده اند و برای تعیین ترکیب شیمیایی، آزمون کوانتومتری انجام شد که نتایج آزمون در جدول ۵ آورده شده است.

تحلیل های عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود DEFORM-3D انجام شده اند. با توجه به تقارن محوری مدل، برای کمتر شدن زمان تحلیل ها، از مدل ۱/۴ استفاده شده است. کلیه ابزارهای شکل دهی به صورت صلب در نظر گرفته شده اند و فقط ورق

آزمون تجربی با نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود مطابقت خوبی داشت. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون تجربی، خواص مکانیکی برای انجام شبیه‌سازی در هر مرحله از کشش، مطابق با آزمون آزمایشگاهی و ضریب اصطکاک نیز متناسب با لایه روان کار مورد استفاده برای نرم‌افزار تعریف شدند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای هر مرحله از کشش در جدول ۶ آورده شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که تقابل خوبی میان نتایج آزمون تجربی و مدل اجزا محدود وجود دارد.

جدول ۶- مقایسه نتایج نرم‌افزار و آزمون تجربی کشش عمیق و

اتوکاری استوانه برنجی

نام مراحل	طول (mm)		قطر خارجی (mm)		ضخامت جداره (mm)	
	نرم‌افزار	تجربی	نرم‌افزار	تجربی	نرم‌افزار	تجربی
کشش اول	۱۲/۱۹	-۰/۵ ۱۲/۳	۱۴/۹۰	-۰/۱ ۱۴/۹	۱/۷۵	۱/۷۰
کشش دوم	۳۶/۸۷	۳۲+۶	۱۲/۳۸	-۰/۰۵ ۱۲/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۰
کشش سوم	۴۹/۶۶	۴۸+۶	۱۱/۱۶	-۰/۰۳ ۱۱/۱۸	۰/۳۲	۰/۳۰

شکل ۴ و ۵ نمونه‌هایی از قطعات کشش عمیق و اتوکاری شده در سه مرحله را نشان می‌دهند.



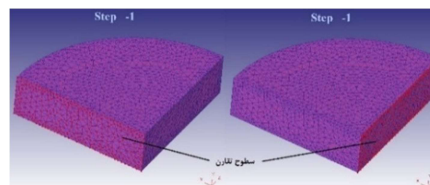
شکل ۴- نمونه‌هایی از قطعات کشش عمیق و اتوکاری شده در سه مرحله

به منظور بررسی و مقایسه ضخامت قطعات در راستای طول، در مدل المان محدود و آزمون‌های تجربی، قطعات در راستای طول برش زده شدند و ضخامت در تمام طول قطعات در هر سه مرحله شکل‌دهی اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از مدل المان محدود با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه و صحت‌سنجی شده‌اند. شکل ۶ تا ۸، نمای برش خورده از قطعات مراحل اول تا سوم برای مدل المان محدود و آزمون تجربی را نشان می‌دهند.



شکل ۶- نمای برش خورده قطعه بعد از مرحله اول شکل‌دهی (a): آزمون تجربی و (b): مدل المان محدود

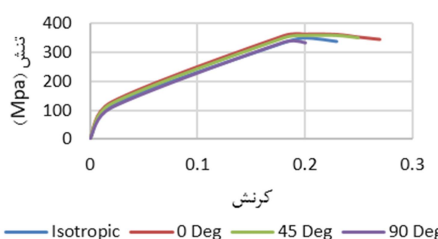
در تحلیل‌های سه بعدی و همین‌طور در مورد قطعاتی با سطوح منحنی، المان‌های مثلثی مناسب هستند که قطعه مش زده شده با تعیین سطوح تقارن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- قطعه مش زده شده با تعیین سطوح تقارن

به منظور بررسی اهمیت آنیل ورق اولیه، قبل از پولک زنی و مراحل کشش، تحلیل عددی کشش مرحله اول با ورق آنیل نشده انجام شد. ورق برنجی مورد استفاده ناهمسانگرد بوده و خواص ناهمسانگردی از طریق آزمون کشش به دست آمدند. آزمون‌ها بر روی سه نمونه تهیه شده از ورق در راستای نورد، ۴۵ درجه نسبت به راستای نورد و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق انجام شدند که نمودار نتایج آزمون‌ها در شکل ۳ آورده شده‌اند. ضرایب ناهمسانگردی $\bar{r}_0, \bar{r}_{45}, \bar{r}_{90}$ در جدول ۵ آورده شده‌اند و در نهایت به منظور بررسی عیب گوش دار شدن^۱ در قطعه، ضریب Δr که بیان‌گر ناهمسانگردی صفحه‌ای است [۹]، محاسبه شده و در تحلیل عددی کشش مرحله اول مورد استفاده قرار گرفت.

آلیاژهای روی ضریب حساسیت به نرخ کرنش بسیار بالایی دارند که این اثر باعث مقاومت بالا در برابر گلوپی شدن می‌شود که در نتیجه آن تغییر طول یکنواخت بالا می‌باشد و از طرفی آلیاژهای روی نمای کارسختی پایینی دارند [۸] که اثر این دو پارامتر در نمودار آزمون کشش تجربی نیز قابل مشاهده است که در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- نمودار تنش کرنش برای نمونه همسانگرد، راستای نورد، ۴۵ درجه نسبت به راستای نورد، عمود بر راستای نورد

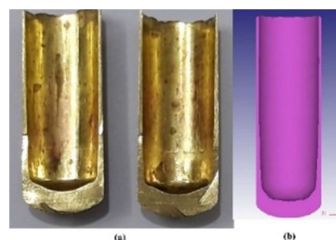
جدول ۵- خواص ناهمسانگردی ورق اولیه

ماده	$\bar{r}_0$	$\bar{r}_{45}$	$\bar{r}_{90}$	$\bar{r}$	Δr
CuZn30	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۱	۰/۸۶	-۰/۰۲

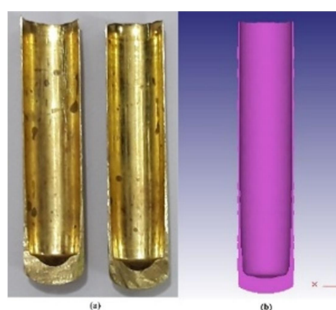
۳- صحت‌سنجی مدل اجزا محدود

در این پژوهش استوانه برنجی طی سه مرحله کشش عمیق و اتوکاری دیواره و دو مرحله آنیل تولید شد که در نهایت ابعاد محصول

^۱ Earing



شکل ۷- نمای برش خورده قطعه بعد از مرحله دوم شکلدهی (a):
آزمون تجربی و (b): مدل المان محدود

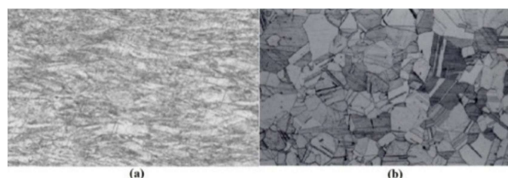


شکل ۸- نمای برش خورده قطعه بعد از مرحله سوم شکلدهی (a):
آزمون تجربی و (b): مدل المان محدود

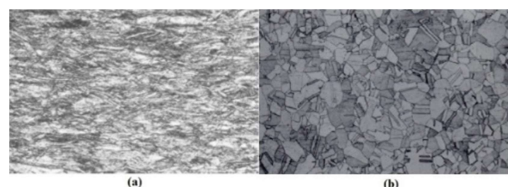
این منظور نمونه‌ها به وسیله کلرید مس آمونیاکی اچ شده‌اند. شکل ۱۱ و ۱۲ نتایج متالوگرافی سطح را با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر نشان می‌دهند که با استفاده از میکروسکوپ نوری تهیه شده‌اند. مشاهده می‌شود که ریز ساختار نمونه‌ها بعد از آنیل به صورت چندوجهی همراه با دانه‌های هم محور و مساوی می‌باشند. بعد از مراحل کشش (قبل از آنیل)، دانه‌های قطعات به طور قابل توجهی در جهت کشش و اتوکاری، افزایش طول داده‌اند. مشاهده می‌شود که بعد از انجام آنیل دانه‌ها درشت شده و در نتیجه سختی آن‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به بالا بودن دما و زمان آنیل مرحله اول، مرزدانه‌ها حل شده که منجر به درشت شدن دانه‌ها شده است. اندازه دانه‌های بدست آمده از متالوگرافی در جدول ۸ آورده شده اند. طبق رابطه هال-پچ^۱ اندازه دانه‌ها با خواص مکانیکی مواد پلی کریستال ارتباط دارد.

جدول ۸-مقادیر اندازه دانه بندی دیواره قطعات کشش و اتوکاری شده
برنجی

نام مراحل	قبل از آنیل (mm)	بعد از آنیل (mm)
کشش اول	۰/۰۳	۰/۰۶
کشش دوم	در این مرحله آنیل انجام نشده	در این مرحله آنیل انجام نشده
کشش سوم	۰/۰۱	۰/۰۲۵



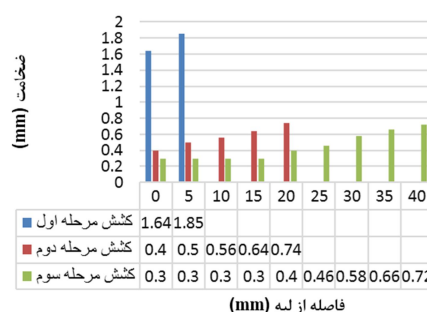
شکل ۱۱- ریز ساختار قطعه بعد از کشش و اتوکاری مرحله اول، (a):
قبل از آنیل و (b): بعد از آنیل



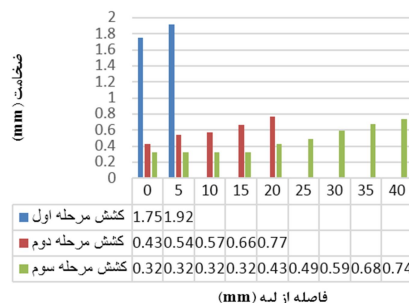
شکل ۱۲- ریز ساختار قطعه بعد از کشش و اتوکاری مرحله سوم، (a):
قبل از آنیل و (b): بعد از آنیل

بعد از انجام کشش و اتوکاری، سختی قطعه در تمامی نقاط یکسان نیست و در اثر کارسختی در مناطقی که تغییر شکل پلاستیک بیشتری رخ داده باشد، سختی آنجا بیشتر خواهد بود. طبق نتایج آزمون‌های سختی سنجی انجام شده، در فئان‌های کشش و اتوکاری شده نیز سختی در لبه بالایی دیواره بیشترین مقدار (۱۷۷/۵۸ ویکرز) و در کف نیز کمترین مقدار (۱۱۳/۴۷ ویکرز) را دارد. در یک قطعه اتوکاری شده مطلوب و قابل قبول، میزان اتوکاری در سطح داخلی بیشتر از سطح خارجی می‌باشد. این تغییر شکل بیشتر در سطح داخلی نسبت به سطح خارجی، منجر به ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح داخلی

شکل ۹ و ۱۰ نتایج حاصل از اندازه گیری ضخامت نمونه ها را برای مدل المان محدود و آزمون های تجربی را نشان می‌دهند.



شکل ۹- بررسی ضخامت حاصل از آزمون های تجربی در راستای طول در نمونه برش زده



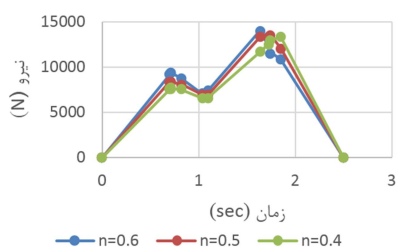
شکل ۱۰- بررسی ضخامت حاصل از مدل المان محدود در راستای طول در نمونه برش زده

۴- نتایج و بحث

ریز ساختار دیواره قطعه قبل و بعد از آنیل به وسیله متالوگرافی سطح به دست آمد که طی آن مورفولوژی دانه‌ها تعیین شده‌اند. برای

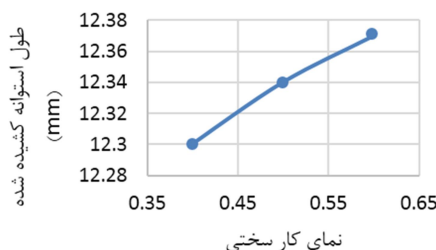
¹ Hall-Petch

کریستالی، که در حالت تعادل پایدار ترمودینامیکی نیستند، تمایل به برطرف شدن دارند. در اثر تغییر شکل، انرژی داخلی ماده کریستالی افزایش یافته و از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار خواهد شد. با افزایش تغییر شکل سرد، دانه‌های کریستالی در امتداد خاصی کشیده می‌شوند، به‌طوریکه این جهت‌گیری خاص دانه‌ها در ریزساختار قابل مشاهده است. این جهت‌گیری دانه‌های کریستالی همراه با تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی و ایجاد ناهمسانگردی در این خواص در جهات مختلف می‌شوند. تغییر شکل پلاستیک سرد موجب افزایش استحکام و سختی و کاهش انعطاف پذیری می‌شود که علت اصلی آن افزایش چگالی نابجایی‌ها در اثر تغییر شکل می‌باشد. در شکل ۱۳ علت کاهش نیرو بعد از اوج اول بازیابی می‌باشد که طی آن نابجایی‌ها آزاد شده و از تجمع و تلاقی آنها کاسته می‌شود و علت بالاتر بودن اوج دوم از اوج اول، بوجود آمدن کارسختی حین تغییر شکل پلاستیک می‌باشد.



شکل ۱۳- نیروی وارد بر سنبه کشش برای n های مختلف

بر خلاف کشش عمیق، مقادیر n بر قابلیت اتوکاری تأثیری ندارند، زیرا هم تغییر شکل واداشته و هم حالت شکست شامل کرنش صفحه‌ای یکسان است [۸]. شکل ۱۴ تأثیر تغییر نمای کارسختی را بر طول استوانه کشش یافته نشان می‌دهد. با تغییر نمای کار سختی، طول استوانه و توزیع کرنش موثر تغییر بسیار کمی دارد.



شکل ۱۴- تأثیر تغییر نمای کار سختی بر طول استوانه کشش یافته

در تحلیل با در نظر گرفتن خواص ناهمسانگرد برای ورق اولیه، ضریب لنگفورد ۰/۰۲- به دست آمد. در این تحلیل لبه‌های بالای استوانه کاملاً تخت نبوده و نقاط مرتفع و دره‌هایی مطابق شکل ۱۵ به وجود آمده است که گوش‌دار شدن نامیده می‌شود. در این تحلیل نیز مقدار $\Delta R = -0.02$ به دست آمده و دو گوش در زاویه ۴۵ درجه ایجاد شد.

و تنش‌های پسماند کششی در سطح خارجی قطعه می‌شود. با توجه به این که حداکثر تنش‌های پسماند در فنجان‌های کشش و اتوکاری شده در لبه بالایی و در سطح خارجی قطعه ایجاد می‌شوند و پارگی و ترک‌خوردگی احتمالی نیز از لبه بالایی شروع می‌شود [۸] و سختی این محل نیز بیشترین مقدار را دارد، از این رو اطلاع از سختی این مناطق اهمیت بیشتری دارد تا در صورت تجاوز سختی از حد مجاز اقدامات اصلاحی نظیر تغییر در پارامترهای فرآیند کشش و یا انجام آنیل تنش‌زدایی برای کاهش سختی و آزاد کردن تنش‌های پسماند انجام شوند.

طول پوسته کشیده شده با ضریب اصطکاک نسبت مستقیم دارد [۱۴]. با افزایش ضریب اصطکاک، کاهش ضخامت بیشتر می‌شود و در نتیجه کرنش موثر نیز افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش ضخامت، در قسمت بالای دیواره استوانه (لبه) به وجود می‌آید و بیشترین کرنش موثر نیز در نزدیکی لبه ایجاد می‌شود.

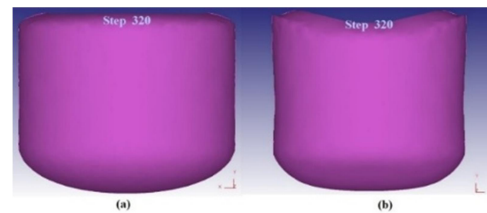
در صورتی که ضریب اصطکاک داخلی (بین قطعه و سنبه) و ضریب اصطکاک خارجی (بین قطعه و ماتریس) برابر باشند، اگر ضریب اصطکاک از یک مقدار مشخصی که بستگی به جنس قطعه و سرعت تغییر شکل دارد بیشتر شود، حداکثر کاهش ضخامت در قطعه ایجاد نمی‌شود. اصطکاک بین قطعه و سنبه، به کشیده شدن قطعه به درون قالب کمک می‌کند، اما اصطکاک بین حلقه اتوکاری و فلز تغییر شکل یافته در جهت مخالف عمل می‌کند [۸]. از آنجایی که راستای حرکت سنبه و قطعه یکی و ماتریس کشش ثابت است، اثرپذیری سطح خارجی قطعه از اصطکاک بیشتر از سطح داخلی خواهد بود. در نتیجه در عمل سطح سنبه زیر تر از سطح ماتریس ساخته شده است و همین طور در فرآیند کشش و اتوکاری استوانه برنجی، ماده روان کار که مخلوط روغن مته و آب (آب صابون صنعتی) می‌باشد، فقط به سطح بین قطعه و ماتریس اعمال می‌شود تا اصطکاک خارجی کاهش یابد. اصطکاک داخلی و خارجی را می‌توان با تغییر در صافی سطح ابزارها و یا اعمال روان کار کنترل کرد.

با افزایش اصطکاک داخلی، تغییر شکل در سطوح داخلی قطعه افزایش یافته و منجر به افزایش کاهش ضخامت می‌شود [۱۴]. افزایش اصطکاک خارجی منجر به تغییر شکل بیشتر در سطح خارجی قطعه می‌شود و منجر به کاهش در درصد کاهش ضخامت قطعه می‌شود [۱۰].

در تحلیل‌های عددی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک ۰/۲۵ به طور یکسان برای سطوح داخلی و خارجی قطعه عیب لبه یا تغییر شکل بیشتر در سطح خارجی نسبت به سطح داخلی به وجود آمد.

کار سختی تغییرات نیروی سنبه در حین وارد کردن نیرو را کنترل می‌کند. با افزایش نمای کارسختی، مقدار بیشینه در اواخر ضربه ایجاد می‌شود. در نتیجه خیز اولیه نیرو کمتر از نیروی وارد شده به سنبه در اواخر ضربه است [۸].

هر نوع عمل اتوکاری در حین کشش سبب افزایش نیروی کشش در نزدیکی پایان کشش می‌شود. LDR فقط در صورتی کاهش می‌یابد که اوج دوم از اوج اول بالاتر باشد [۸]. شکل ۱۳ نیروی وارد بر سنبه کشش را برای n های مختلف در بازه مربوط به برنج CuZn30 یعنی از ۰/۴ تا ۰/۶ [۸] را نشان می‌دهد. تمام عیوب ایجاد شده در ساختار



شکل ۱۵- کشش و اتوکاری مرحله اول، (a): قطعه با ماده همسانگرد با لبه‌های صاف، (b): قطعه با ماده ناهمسانگرد با لبه‌های گوش دار

وابستگی زاویه‌ای گوش دار شدن را می‌توان با این فرض که حالت تنش در لبه بیرونی ورق فشار تک محوری است و این که کرنش فشاری در همه جا در طول لبه بالایی استوانه نهایی مساوی است، تخمین زد [۸]. در این صورت کرنش ضخامت برابر می‌شود با:

$$\varepsilon_{z0} = \frac{-\varepsilon_y}{(R_{0+90} + 1)} \quad (6)$$

که در آن R_{0+90} مقدار R اندازه‌گیری شده در آزمون کشش در امتداد قائم بر θ است. در این حالت تغییرات ضخامت در طول لبه بالای استوانه با رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$t_0 = t_0 \exp \varepsilon_{z0} = t_0 \exp \left(\frac{-\varepsilon_y}{R_{0+90} + 1} \right) = t_0 \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^{1/(R_{0+90} + 1)} \quad (7)$$

فرض می‌شود که هر چند ضخامت جداره استوانه با ارتفاع آن رابطه خطی دارد، مقدار

$$h_0(t_0 + t_0)/2 = h_0 \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^{1/(R_{0+90} + 1)} \right] / 2 \quad (8)$$

در همه نقاط روی لبه بالایی جدار استوانه برابر است. بنابراین:

$$h_{45} \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^{1/(R_{45} + 1)} \right]^{-1} = h_0 \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^{1/(R_{90} + 1)} \right]^{-1} = h_{90} \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^{1/(R_0 + 1)} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$13.78 \left[1 + (0.73)^{1/0.87+1} \right]^{-1} = 13.74 \left[1 + (0.73)^{1/0.81+1} \right]^{-1} = 13.49 \left[1 + (0.73)^{1/0.89+1} \right]^{-1} \quad (10)$$

به ازای نسبت کشش مفروض ارتفاع نسبی گوش، را می‌توان از معادله (۹) به دست آورد.

$$\frac{2h_{45}}{(h_0 + h_{90})} = 1.03 \quad (11)$$

۵- نتیجه گیری

بعد از انجام کشش و اتوکاری، دانه‌ها به طور قابل‌توجهی در جهت کشش، افزایش طول داده‌اند که بعد از انجام آنیل دانه‌ها درشت شده و در نتیجه سختی آن‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به بالا بودن دما و زمان آنیل مرحله اول، مرزدانه‌ها حل شده که منجر به درشت شدن دانه‌ها و نرم‌تر شدن ماده، شده است.

طول پوسته کشیده شده با ضریب اصطکاک نسبت مستقیم دارد. با افزایش ضریب اصطکاک، کاهش ضخامت بیشتر می‌شود و در نتیجه کرنش موثر نیز افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش ضخامت، در قسمت بالای دیواره استوانه (لبه) به وجود می‌آید و در نتیجه بیشترین کرنش موثر نیز در نزدیکی لبه ایجاد می‌شود.

در صورتی که ضریب اصطکاک داخلی (بین قطعه و سنبه) و ضریب اصطکاک خارجی (بین قطعه و ماتریس) برابر باشند، اگر ضریب اصطکاک از یک مقدار مشخصی که بستگی به جنس قطعه و سرعت تغییر شکل دارد بیشتر شود، حداکثر کاهش ضخامت در قطعه ایجاد نمی‌شود. از آنجایی که راستای حرکت سنبه و قطعه یکی و ماتریس کشش ثابت است، اثرپذیری سطح خارجی قطعه از اصطکاک بیشتر از سطح داخلی خواهد بود. با افزایش اصطکاک داخلی، تغییر شکل در سطوح داخلی قطعه افزایش یافته و منجر به افزایش کاهش ضخامت می‌شود. افزایش اصطکاک خارجی منجر به تغییر شکل بیشتر در سطح خارجی قطعه می‌شود و منجر به کاهش در درصد کاهش ضخامت قطعه می‌شود.

کار سختی تغییرات نیروی سنبه در حین واردکردن نیرو را کنترل می‌کند. با افزایش نمای کار سختی، مقدار بیشینه در اواخر ضربه ایجاد می‌شود. در نتیجه افزایش اولیه نیروی وارد بر سنبه، کمتر از نیروی وارد شده در اواخر ضربه است.

خواص ناهمسانگرد برای ورق اولیه به دست آمدند که با اعمال این ضرایب مقدار $\Delta R = -0.02$ به دست آمد و با استفاده از این خواص در تحلیل‌ها، بعد از کشش و اتوکاری دو گوش به ارتفاع $1/0.3$ میلی‌متر در لبه‌های قطعه در زاویه 45° درجه ایجاد شدند.

۶- نمادها

Φ_h	درجه تغییر شکل اصلی
S	ضخامت ورق (mm)
D, d	قطر خارجی و داخلی مفتول (mm)
W	عرض نمونه آزمون کشش (mm)
h	ارتفاع گوش‌های لبه فنجان (mm)

۷- مراجع

- [1] Bača J., Bilík J., Technology of forming process, STU, Bratislava, 2000.
- [2] Vin Calicut. Brasses Properties and Application. CDA Publication No. 117, 1996.
- [3] El-Danaf E., Kalidindi S.R., Dohert R.D., Influence of stacking fault energy and grain size on deformation twinning in low SFE FCC metals, Metall. Mater. Trans, 1999.
- [4] Baudin T., Etter A.L., Penelle R., Annealing twin formation and recrystallization study of cold-drawn copper wires from EBSD measurements, Mater. Charact, 2007.
- [5] Humphreys F.J., Hatherly M., Recrystallization and Related Annealing Phenomena, second ed., Elsevier Ltd., Amsterdam, 2004.
- [6] Ragab M.S., Orban H.Z., Effect of ironing on the residual stresses in deep drawn cups, Journal of Materials Processing Technology, 2000.
- [7] Lange K., Bruckner L., Deformation induced residual stresses and stress corrosion in deep drawn components of brass materials, Transaction of NAMRI/SME, 1990.
- [8] William F., Hosford, Robert M., Caddell, Metal Forming, 3rd Edition. Prentice Hall, 2007.
- [9] ASM Metals Handbook, Vol14.
- [10] Hall E. O., Proc. Phys. Soc. London, 1951.
- [11] Petch N. J., Iron Steel Inst. London, 1953.
- [12] Meyers M. A., Chawla K. K., Mechanical Behavior of Materials, prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [13] Avitzur B., Ironing with unlimited reduction, Proc. 18th Machine Tool Design and Res. Conf., McMillan, London, 1977.
- [14] Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J., Mechanics of sheet metal forming, 2nd ed. Butterworth Heinemann, 2002.