



مطالعه تجربی و عددی تأثیر پارامترهای قالب، سایز دانه و نسبت t/d بر روی برگشت فنری در خمکاری میکرو-W

راحله پودینه‌ئی^۱، سعید شهرکی^{۲*}، هادی ابراهیمی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور مشهد، مشهد، ایران

۲- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

* صندوق پستی ۸۸۴-۹۸۶۱۳۳۵ Saeid.Shahraki@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱ اردیبهشت ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲۷ آبان ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۷ اسفند ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

خمکاری میکرو

آنیلینگ

برگشت فنری

سایز دانه

المان محدود

چکیده

خمکاری میکرو یک فرایند شکل‌دهی جهت ایجاد خم با شعاع‌های بسیار کوچک می‌باشد و در تولید قطعات حساس صنعت الکترونیک به کار برده می‌شود. نکته مهم و کلیدی در فرایند خمکاری میکرو، تولید قطعات با حفظ دقت ابعادی بالا می‌باشد. یکی از عیوب تأثیرگذار بر دقت ابعادی و تلرانسی این قطعات، پدیده برگشت فنری می‌باشد که ارتباط مستقیمی با پارامترهای ابزار و ماده دارد. در پژوهش حاضر، رفتار برگشت فنری ورق مسی C12200 در یک قالب جدید خمکاری به شکل W، مورد مطالعه قرار گرفت؛ همچنین اثرات عوامل فرایندی شامل شعاع سنبه، شعاع ماتریس و نسبت ضخامت ورق به سایز دانه با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش‌های تجربی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین زاویه برگشت فنری برای سایز دانه ۳۳ میکرومتر و کمترین برای سایز دانه ۱۳۳ میکرومتر حاصل می‌گردد. نتایج نشان داد بهترین شرایط از نقطه نظر کاهش زاویه برگشت فنری در حالت کمترین نسبت ضخامت ورق به سایز دانه حاصل می‌شود.

The experimental and numerical study of the effect die parameters, grain size and ratio t/d on spring-back in micro W-bending

Rahele Podinehei¹, Saeid Shahraki^{2*}, Hadi Ebrahimi³

1- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Science and Research, Islamic Azad University Kermanshah, Kermanshah, Iran

* P.O.B. 9861335-884 Zabol, Iran, Saeid.Shahraki@uoz.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 21 April 2022

First Decision: 18 November 2022

Accepted: 08 March 2023

Keywords:

Micro bending

Annealing

Spring-back

Grain size

Finite Element

Abstract

Micro bending is a forming process to create bends with very small radius and it is used in the production of sensitive parts of the electronics industry. The key point of the micro bending process is the production of parts while maintaining high dimensional accuracy. One of the defects effecting the dimensional accuracy and tolerance of these parts is the spring-back phenomenon which is directly related to the parameters of the tool and the material. In the present study, the spring back behavior of C12200 copper sheet in a new W-shaped bending die has been studied. Also, the effects of process factors including punch radius, die radius and sheet thickness to grain size ratio it was analyzed using finite element simulation and experimental tests. The results showed that the highest spring back angle is obtained for the grain size of 33 μm and the lowest for the grain size of 133 μm . The results showed that the best conditions in terms of reducing the spring back angle are obtained in the lowest ratio of sheet thickness to grain size.

خمکاری میکرو یک فرایند شکل‌دهی برای تولید قطعات کوچک

و میکرو مانند میکرو سوئیچ‌های الکترونیکی، سنسورهای مکانیکی و جعبه‌های فلزی در صنعت الکترونیک محسوب می‌شود [۱].

۱- مقدمه

توسعه سریع فرایندهای شکل‌دهی میکرو^۱، از جمله فرایند خمکاری میکرو، در چند سال اخیر بسیار گسترش یافته است.

¹ Micro Forming

Please cite this article using:

R. Podinehei, S. Shahraki, H. Ebrahimi, The experimental and numerical study of the effect die parameters, grain size and ratio t/d on spring-back in micro W-bending, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 1-9, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/ijme.2023.338676.1647>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ورق پلیمری با افزایش ضخامت و کاهش نرخ سرد شدن کاهش می‌یابد. چانگ و همکاران [۷] تأثیر سایز دانه و شعاع سنبه را در فرایند خمکاری میکرو در یک قالب با شکل دهانه V مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش نسبت شعاع سنبه به ضخامت ورق، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. همچنین زاویه برگشت فنری با کاهش سایز دانه، کاهش می‌یابد. زاوو و همکاران [۸] با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تأثیر پارامترهای ضخامت فویل، جهت الیاف^۵، سایز دانه و ارتعاش سنبه بر رفتار برگشت فنری در فرایند خمکاری میکرو را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات ضخامت فویل و ارتعاش سنبه بیشترین تأثیر را در کاهش زاویه برگشت فنری دارد. کیسوانتو و همکاران [۹] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأثیر سرعت بارگذاری و زمان توقف سنبه در مرحله بارگذاری بر پدیده برگشت فنری فویل مسی به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر را مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری و زمان توقف سنبه، زاویه برگشت فنری کاهش می‌یابد. لیو و همکاران در تحقیقی دیگر [۱۰] تأثیر اندازه بر رفتار برگشت فنری فویل‌های فلزی در خمش میکرو را مطالعه کردند. آن‌ها یک مدل ساختاری براساس مدل لایه سطحی^۶ جهت تجزیه و تحلیل پدیده برگشت فنری ارائه دادند. در این مدل برای هر بخش داخلی، هر دانه به‌عنوان یک کامپوزیت در نظر گرفته شد که شامل بخش داخلی دانه و لایه‌میزی سخت شده دانه بود. سپس از یک مدل کامپوزیت کلاسیک برای محاسبه تنش جریان استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش ضخامت فویل یا افزایش اندازه دانه، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۱] رفتار برگشت فنری فویل‌های ترکیبی نیکل-مس را در یک قالب انعطاف‌پذیر به روش خمکاری میکرو بررسی نمودند. آن‌ها آزمایش‌های تجربی را برای سه زاویه مختلف سنبه و تحت دمای مختلف آنیلینگ انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه برگشت فنری با افزایش زاویه خم و دمای آنیلینگ افزایش می‌یابد.

با بررسی مقالات و تحقیقات انجام‌شده مشخص گردیده است که محققان بیشتر بر روی پارامترهایی مانند سایز دانه، شعاع سنبه، شعاع ماتریس و ضخامت ورق با توجه به اینکه پدیده برگشت فنری به کمترین مقدار برسد، تمرکز داشته‌اند زیرا این موارد جزء مهم‌ترین عوامل مورد بررسی در فرایند خمکاری میکرو در قالب‌های U, V و L هستند. براین اساس تصمیم گرفته شد تا در پژوهش حاضر، برای اولین بار تأثیر هم‌زمان پارامترهای ذکرشده بر پدیده برگشت فنری در یک

خمکاری^۱ یکی از فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که جهت ایجاد خم به‌منظور تغییر شکل دائم حول یک محور مستقیم بکار برده می‌شود. خمکاری ورق‌های فلزی روش‌های گوناگونی دارد که بایستی روش مناسب را با توجه به مواردی چون جنس و ضخامت ورق، طرح موردنظر برای خم کردن و میزان خمش، انتخاب کرد. از متداول‌ترین روش‌های خمکاری ورق‌های فلزی، می‌توان به خمکاری V، خمکاری U و خمکاری دورانی اشاره نمود. با توجه به فرایند خمکاری میکرو، برگشت فنری^۲ که در مرحله باربرداری و آزاد شدن تنش‌های محبوس شده در طی فرایند خمکاری میکرو نمایان می‌شود، یکی از عیوب تأثیرگذار بر دقت ابعادی و تoleransi این قطعات محسوب می‌شود [۲]. به‌طورکلی، برگشت فنری در قطعات خمکاری میکرو ارتباط مستقیمی با پارامترهای ابزار شامل شعاع سنبه، شعاع ماتریس، میزان لقی^۳، شکل دهانه قالب و پارامترهای ماده شامل خواص مکانیکی، ضخامت و سایز دانه^۴ دارد [۳]. بنابراین مطالعه دقیق رابطه بین تأثیر پارامترهای فرایندی و پدیده برگشت فنری و دستیابی به ترکیب پارامترهای بهینه در این فرایند از اهمیت بالایی برخوردار است. در چند سال اخیر، تعدادی از محققان تأثیر برخی از پارامترهای مختلف بر روی پدیده برگشت فنری در فرایند خمکاری میکرو را بررسی نموده‌اند. ناندکار و همکاران [۴] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأثیر زاویه سنبه، طول دهانه قالب، نرخ شعاع قالب به ضخامت ورق و شعاع سنبه را بر رفتار برگشت فنری بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه سنبه مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در برگشت فنری می‌باشد. لیو و همکاران [۵] تأثیر ضخامت و سایز دانه بر رفتار برگشت فنری فویل‌های برنجی در یک قالب V شکل با زائده‌ای به شعاع ۰/۴ میلی‌متر را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت فویل برنجی، سایز دانه و نسبت ضخامت ورق به سایز دانه تأثیر چشمگیری بر استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول در آزمایش کشش داشته است به‌طوری‌که با کاهش نرخ t/d، استحکام تسلیم کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش نرخ t/d و افزایش ضخامت فویل برنجی، زاویه برگشت فنری کاهش می‌یابد. ماتسوشیدا و همکاران [۶] به صورت تجربی اثر پارامترهای ضخامت ورق و نرخ سرد شدن بر زاویه برگشت فنری در خمکاری ورق پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه برگشت فنری

¹ Bending

² Spring-Back

³ Clearance

⁴ Grain Size

⁵ Texture

⁶ Surface Layer

میکروسکوپ نوری با برند تجاری LEITZ-Metallux3 طبق استاندارد ASTM E883-17 تهیه گردید.



Fig. 1 Annealed copper sheets at different temperatures – thickness 0.3 mm
شکل ۱ ورق‌های مسی آنیل شده در دماهای مختلف- ضخامت ۰٫۳ میلی‌متر

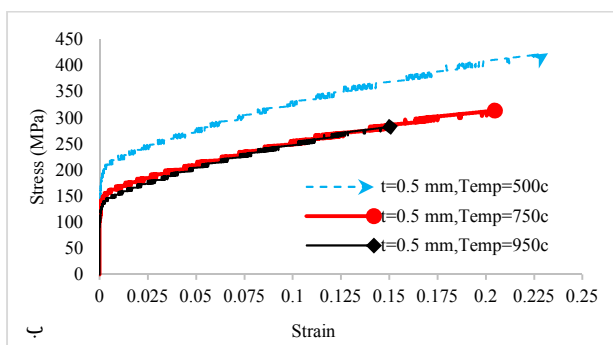
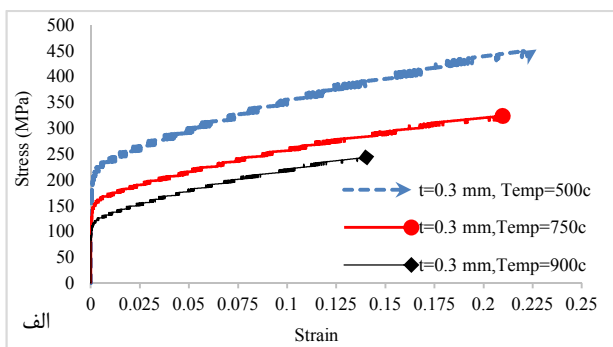


Fig. 2 The true stress-strain curves (a) thickness 0.3 mm (b) thickness 0.5 mm

شکل ۲ نمودار تنش- کرنش حقیقی به‌دست‌آمده از آزمون کشش الف) ضخامت ۰٫۳ میلی‌متر ب) ضخامت ۰٫۵ میلی‌متر

۲-۲- ساخت قالب

مجموعه قالب خمکاری با شکل دهانه W در شکل ۳ نشان داده شده است. جنس مجموعه قالب خمکاری از فولاد ابزار سرد کار گرید^۳ ۱/۲۰۸۰ در نظر گرفته شده است زیرا این فولاد هنگام آبکاری تغییر فرم نمی‌دهد و دارای سختی بین ۶۳-۶۵ راکول C می‌باشد. نقشه ساخت و جزئیات اجزاء قالب خمکاری در شکل ۴ نشان داده شده است؛ همچنین مقادیر کمیت‌های هندسی در

قالب جدید با هندسه W مطالعه شود؛ همچنین به بررسی یک رویکرد جدید یعنی تأثیر مستقیم نسبت ضخامت ورق به سایز دانه برای مطالعه پدیده برگشت فنری پرداخته شده است.

۲- ماده و آزمایش

۲-۱- آزمایش کشش تک‌محوره

با توجه به کاربردهای عمده ورق‌های مسی در صنایع الکترونیک، نیروگاهی و نظامی و به دلیل خاصیت انعطاف‌پذیری، هدایت الکتریکی و گرمایی خوب جهت استفاده در قسمت‌های مختلف مبدل‌های حرارتی، الکترومغناطیس‌ها و موتورهای الکتریکی، در این پژوهش از ورق‌های مسی با درجه خلوص ۹۹/۹۹ درصد با نام تجاری C12200 استفاده شده است. ورق‌های استفاده شده به شکل مستطیل و به ابعاد ۶×۲۲ میلی‌متر بوده که در دو ضخامت ۰٫۳ و ۰٫۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها فرایند عملیات حرارتی آنیلینگ^۱ انجام گرفته است. هدف از این عملیات حذف اثرات کارسختی در مرحله تولید ورق‌های مسی و افزایش انعطاف‌پذیری و ایجاد ساختار یکنواخت می‌باشد. همچنین جهت انجام عملیات آنیلینگ، ورق‌های مسی در داخل یک کوره عملیات حرارتی با دقت دمایی ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه در سه بازه دمایی ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده‌اند و سپس با خاموش کردن کوره اجازه داده می‌شود تا ورق‌های مسی در داخل کوره تا دمای محیط به‌آرامی سرد شوند (شکل ۱). هدف از انتخاب زمان و دمای انتخاب شده برای انجام فرایند آنیلینگ ورق‌های مسی در پژوهش حاضر، بررسی و مطالعه بازه‌های متفاوت نسبت به سایر تحقیقات انجام‌شده می‌باشد.

به‌منظور تعیین خواص مکانیکی ورق‌ها، ابتدا نمونه‌های کشش طبق استاندارد ASTM-E8 آماده‌سازی شدند؛ سپس آزمون کشش در راستای طولی ورق با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. همچنین نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه برش لیزر مدل TB-6090 برش داده شدند. نمودار تنش-کرنش حقیقی برای ورق مسی C12200 آنیل شده حاصل از آزمون کشش تک‌محوره در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، عملیات تعیین سایز دانه مطابق با استاندارد ASTM E3-17 انجام شد. آماده‌سازی متالوگرافی^۲ توسط دستگاه Struers آلمان و تصاویر مورد نیاز از سطوح نمونه‌ها توسط

¹ Annealing

² Metallography

³ Grade

مطابق با نتایج آزمایش کشش به نرم‌افزار المان محدود آباکوس معرفی گردیده است. رفتار تماسی بین ورق، سنبه و ماتریس با مدل تماسی پنالتی و به کمک مدل اصطکاکی کولمب توصیف شده و ضریب اصطکاک [۱۳] بین ورق و ماتریس و ورق و سنبه ۰/۱ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی و بارگذاری به نقطه مرجع قالب و سنبه اختصاص داده شده است؛ همچنین بارگذاری به صورت جابجایی و به مقدار ۴/۵ میلی‌متر در نرم‌افزار المان محدود آباکوس اعمال شده است.

مطابق شکل ۵-الف از المان تغییر شکل‌پذیر CPS4R برای مدلسازی ورق استفاده شده است. همچنین به منظور مستقل بودن نتایج تحلیل از تغییرات اندازه المان، آنالیز حساسیت المان (رابطه بین سایز مش و زاویه برگشت فنری) انجام شده است و در نهایت بهینه‌ترین اندازه المان برای ورق برابر با ۰/۱۶۵ میلی‌متر به دست آمده است. لازم به ذکر است جهت مطالعه دقیق زاویه برگشت فنری، ۴ المان در جهت ضخامت ورق در نظر گرفته شده است. برای محاسبه زاویه برگشت فنری، موقعیت ۱۴ گره به کمک ابزار ست^۱ بر روی تار خنثی ورق تغییر شکل یافته حاصل از فرایند خمکاری میکرو تعیین شده است سپس با انتقال مختصات هر گره به نرم‌افزار ترسیم اتوکد، زاویه برگشت‌پذیری محاسبه شده است (شکل ۵-ب).

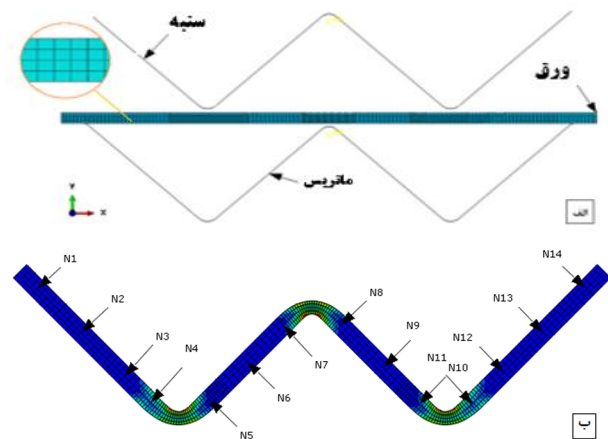


Fig. 5 a) Finite element model of bending process b) Schematic of calculating the spring back

شکل ۵ الف) مدل المان محدود فرایند خمکاری ب) شماتیک محاسبه زاویه برگشت‌پذیری

۴-۲- آزمایش‌های تجربی

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود^۱، آزمایش‌های تجربی مطابق با شرایط شبیه‌سازی انجام

^۱ Set

جدول ۱ نشان داده شده است که در آن t برابر با ضخامت ورق می‌باشد.

لازم به ذکر است مقدار لقی مجاز بین سنبه و ماتریس به صورت معادله ۱ در نظر گرفته شد.

$$C = t/20 \quad (1)$$

در رابطه ۱، t بیان‌کننده ضخامت ورق می‌باشد.

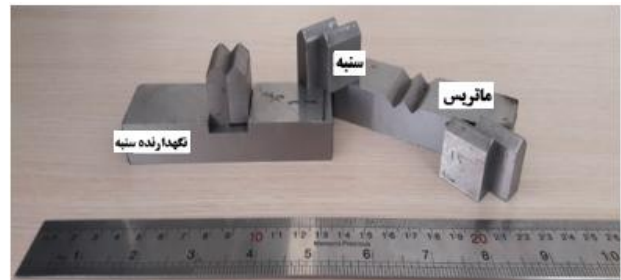


Fig. 3 images of the die components bending

شکل ۳ تصویر اجزای قالب خمکاری

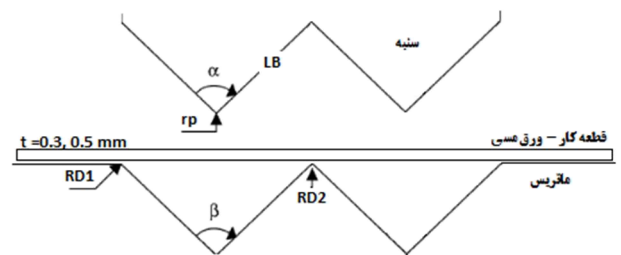


Fig. 4 Schematic view of the die bending

شکل ۴ نمای شماتیک قالب خمکاری

جدول ۱ مقادیر پارامترهای هندسی

Table 1 Values of geometric parameters

اندازه	نماد	کمیت
$8t$	L_B	طول ساق سنبه
۹۰ درجه	α	زاویه دهانه سنبه
۰/۵ میلی‌متر	RD_1	شعاع ماتریس
۹۰ درجه	β	زاویه دهانه ماتریس
$1-3t$	RD_2	شعاع مؤثر ماتریس
$0/3 - 0/5 - 0/8$ میلی‌متر	r_p	شعاع سنبه

۳-۲- شبیه‌سازی فرایند خمکاری با مقطع W

با شبیه‌سازی فرایند خمکاری ورق مسی در قالب با هندسه W، پارامترهایی نظیر زاویه برگشت فنری و تنش فون میزز مورد بررسی قرار گرفتند. برای مدلسازی فرایند، از حل‌گر صریح [۱۲] نرم‌افزار آباکوس 2016 استفاده شده است. در این مدلسازی رفتار ورق به صورت کشسان-مومسان و اجزاء فرایند خمکاری به صورت صلب در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی ورق‌های استفاده شده

گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه کشش یونیورسال UTM استفاده شده است. دستگاه هیدرولیک انتخاب شده دارای کورس قابل کنترل ۷۰۰ میلی‌متر، نیروی ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و نرخ پیشروی ۳ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. جهت گیره بندی مجموعه قالب خمکاری میکرو بر روی فک ثابت دستگاه از سیستم گیره بندی پله‌ای و جهت موقعیت‌دهی سنبه^۲ نسبت به ماتریس^۳ از یک میل تویی فولادی به‌عنوان واسط بین سنبه گیر و فک متحرک دستگاه هیدرولیک استفاده شده است. بعد از جانمایی ست قالب خمکاری بر روی دستگاه کشش هیدرولیک، نمونه مورد بررسی کدگذاری و تحت شرایط خمکاری قرار داده شد. در این مرحله میزان جابجایی سنبه ۴/۵ میلی‌متر توسط کامپیوتر به دستگاه فرمان داده شد. همچنین به‌منظور دقت و صحت در نتایج، سه نمونه به‌صورت تکرار تحت آزمایش خمکاری میکرو در نظر گرفته شد. بعد از مرحله بارگذاری، سنبه به موقعیت اولیه خود بازگشت داده شده و زاویه برگشت فنی به کمک ابزار زاویه‌سنج^۴ دیجیتال اندازه‌گیری شده است.

۳- نتایج و بحث

در این مقاله، اثر پارامترهای شعاع سنبه، شعاع ماتریس و نسبت ضخامت ورق به سایز دانه بر روی میزان برگشت فنی که به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده، به روش المان محدود و

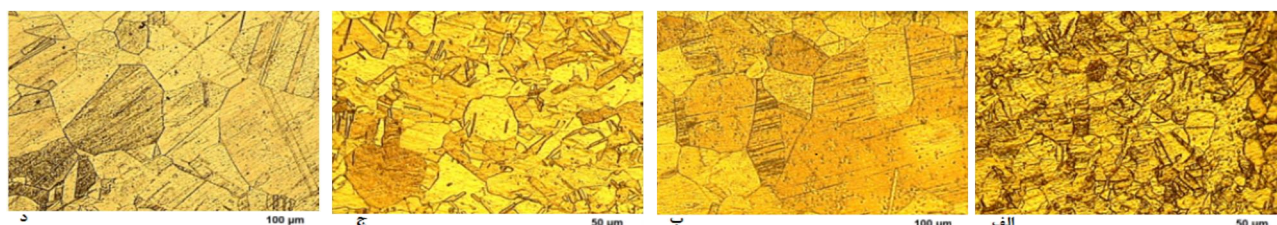


Fig. 6 Microstructures of the copper C12200 (a) thickness=0.5 mm t=60 min T=500°C (b) thickness=0.5 mm t=150 min T=900°C, (c) thickness=0.3 mm t=60 min T=500°C, (d) thickness=0.3 mm t=150 min T=900°C

شکل ۶ ریزساختار مس C12200 (الف) ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد (ب) ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، زمان ۱۵۰ دقیقه و دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد (ج) ضخامت ۰/۳ میلی‌متر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (د) ضخامت ۰/۳ میلی‌متر، زمان ۱۵۰ دقیقه و دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۲ پارامترهای عملیات حرارتی آنیلینگ و سایز دانه

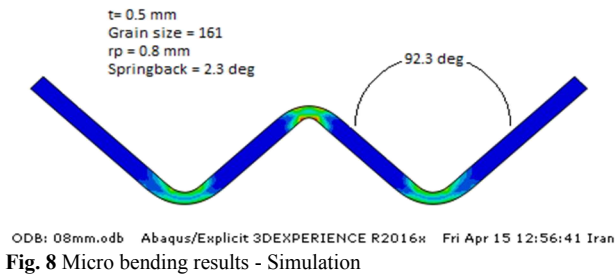
شرایط ۴		شرایط ۳		شرایط ۲		شرایط ۱		شرایط آنیلینگ
دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۱۵۰ دقیقه		دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۹۰ دقیقه		دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۶۰ دقیقه		بدون آنیلینگ		
0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	ضخامت ورق (mm)
161	143	133	121	33	30	12.5	15	سایز دانه (μm)
3.1	2	3.8	2.5	15.2	10	40	20	نرخ ضخامت ورق به سایز دانه

¹ FEM

² Punch

³ Die

⁴ Protractor



شکل ۸ نتایج میکرو خمکاری - شبیه‌سازی

تأثیر سایز دانه بر روی زاویه برگشت فنری در شرایط مختلف ضخامت ورق و شعاع سنبه یکسان، در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار ۹-الف مشاهده می‌شود برای شعاع سنبه ۰/۳ میلی‌متر با افزایش سایز دانه به جزء شرایط بدون آنیلینگ، زاویه برگشت فنری افزایش یافته است؛ زیرا با افزایش سایز دانه، جریان تنش مطابق با منحنی تنش- کرنش حقیقی به‌دست‌آمده از آزمون کشش و استحکام تسلیم، کاهش می‌یابد [۱۳] و کاملاً با رابطه هال-پیچ [۱۵] همخوانی دارد. همچنین در نمونه‌های بدون آنیلینگ به دلیل جهت‌دار شدن دانه‌ها بر اثر کار سرد، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد. بنابراین جهت‌گیری دانه‌ها یک فاکتور مهم در کنترل زاویه برگشت فنری است. شکل ۹-ب و ۹-ج نشان می‌دهد که بیشترین زاویه برگشت فنری برای سایز دانه ۳۰ میکرومتر و کمترین زاویه برگشت فنری برای سایز دانه ۱۳۳ میکرومتر بدست آمده است؛ همچنین پارامتر شعاع سنبه تأثیر بسیار مهمی بروی تنش‌های پسماند در مرحله بارگذاری فرایند خمکاری میکرو داشته است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود بیان می‌کند که برای شرایط ضخامت و سایز دانه یکسان با افزایش شعاع سنبه از ۰/۳ به ۰/۸ میلی‌متر، تنش فون میزز از ۲/۷۶ مگاپاسگال به ۳/۹ مگاپاسگال افزایش یافته است زیرا با انتخاب شعاع‌های بزرگ برای سنبه، ناحیه تغییر شکل پلاستیک در منطقه خم افزایش یافته است و در نتیجه زاویه برگشت فنری نیز افزایش می‌یابد (شکل ۹ ب و ج).

همان‌طور که از نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مشاهده می‌شود برای نسبت ضخامت ورق به سایز دانه‌های کوچک، زاویه برگشت فنری کاهش یافته است به طوری که با تئوری‌های کلاسیک خمکاری میکرو کاملاً مطابقت دارد [۱۱] بنابراین بیشترین زاویه برگشت فنری برای نسبت ۲۰ و کمترین زاویه برگشت فنری برای نسبت ۳/۸ بدست آمد (شکل ۹ ج). شکل ۱۰ نتایج آزمایش‌های تجربی برای شرایط شعاع سنبه یکسان و سایز دانه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

در شکل ۷ نتایج مقدار زاویه برگشت فنری حاصل از فرایند خمکاری به روش المان محدود و آزمایش‌های تجربی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد و مقدار انحراف حدود ۱۸ درصد است. انحراف مشاهده شده ناشی از این است که در نرم‌افزار المان محدود آباکوس رفتار ماده بصورت رابطه بین سایز دانه و تنش جریان تعریف شده است و از اثر هندسه دانه در معادله حساسیت ماده صرف نظر شده است [۱۴]. همچنین عامل اصطکاک در تمام نقاط قالب خمکاری یکسان در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر می‌توان بخشی از خطا را مربوط به نحوه اندازه‌گیری تجربی، زاویه برگشت فنری دانست. شکل ۸ مقدار زاویه برگشت فنری برای ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، سایز دانه ۱۶۱ میکرومتر و شعاع سنبه ۰/۸ میلی‌متر حاصل از شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد.

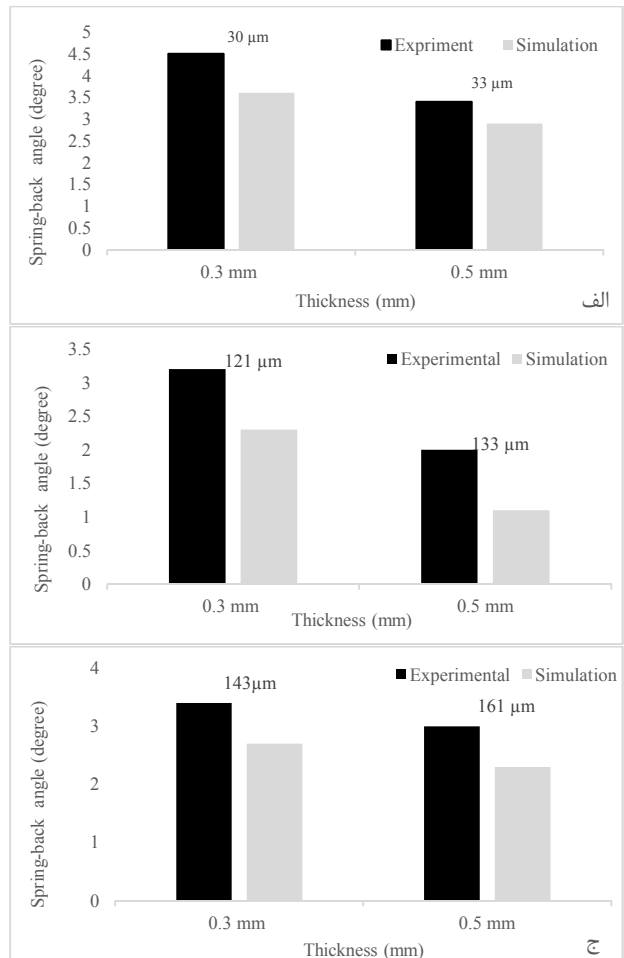


Fig. 7 Comparison of the spring-back angle between experiment and simulation for (a) Temp=500 c, t=60 min (b) Temp=750 c, t=90 min (c) Temp=900 c, t=150 min

شکل ۷ مقایسه زاویه برگشت فنری بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی (الف) دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۶۰ دقیقه (ب) دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۹۰ دقیقه (ج) دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۱۵۰ دقیقه

تأثیر شعاع ماتریس بر زاویه برگشت فنری در شرایط ضخامت ورق ۰/۳ میلی‌متر و شعاع سنبه ۰/۳ میلی‌متر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شعاع ماتریس، ورق خمکاری شده تمایل به رفتار برگشت فنری منفی^۱ دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اختلاف تنش‌های فشاری در ناحیه تماس ورق با شعاع ماتریس (سطح زیرین ورق) و شعاع سنبه با ورق (سطح بالایی ورق) به ازای شعاع‌های مختلف ماتریس سبب افزایش تنش‌های پسماند فشاری در مرحله بارگذاری شده است و مقدار زاویه برگشت فنری منفی را افزایش می‌دهد. شکل ۱۲ تنش فون میزز و زاویه برگشت فنری در مرحله باربرداری برای شرایط شعاع سنبه ۰/۳ میلی‌متر، شعاع ماتریس موثر ۰/۸ میلی‌متر و سایز دانه ۱۴۸ میکرومتر را نشان می‌دهد.

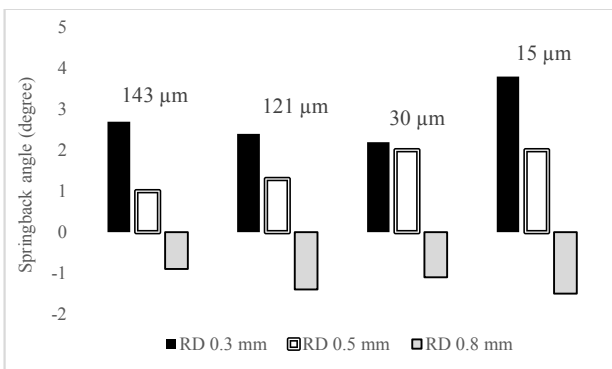


Fig. 11 Influence of die radius and grain size on spring-back

شکل ۱۱ تأثیر شعاع ماتریس و سایز دانه بر روی برگشت فنری

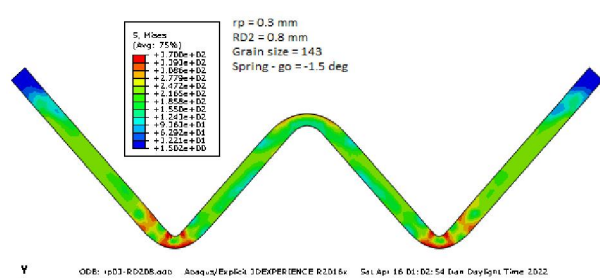


Fig. 12 Micro bending results – Simulation

شکل ۱۲ نتایج میکرو خمکاری- شبیه‌سازی

جهت بررسی تأثیر ابعاد قالب بر رفتار برگشت فنری، یک مطالعه تجربی در دو قالب با اختلاف نسبت ابعادی 4:1 مطابق شکل ۱۳ انجام شد؛ همچنین در این مطالعه ضخامت ورق و شرایط سیکل عملیات حرارتی به صورت یکسان در نظر گرفته شد. نتایج تأثیر ابعاد قالب بر زاویه برگشت فنری در جدول ۳ نشان داده شده است.

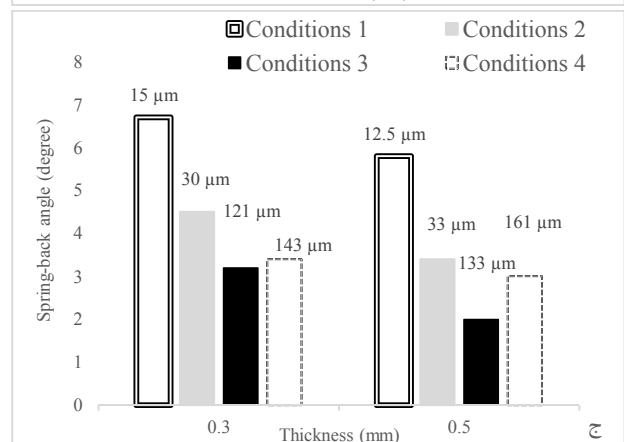
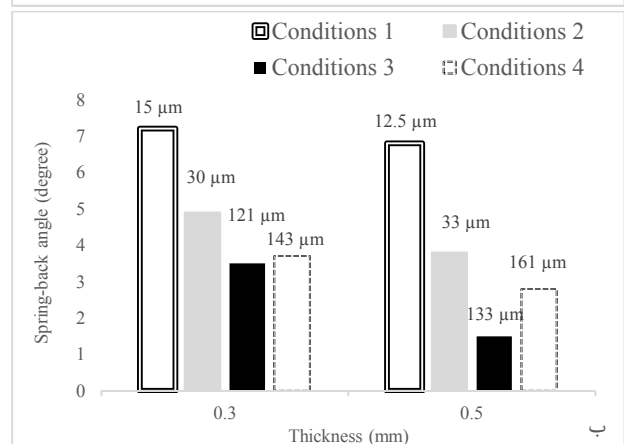
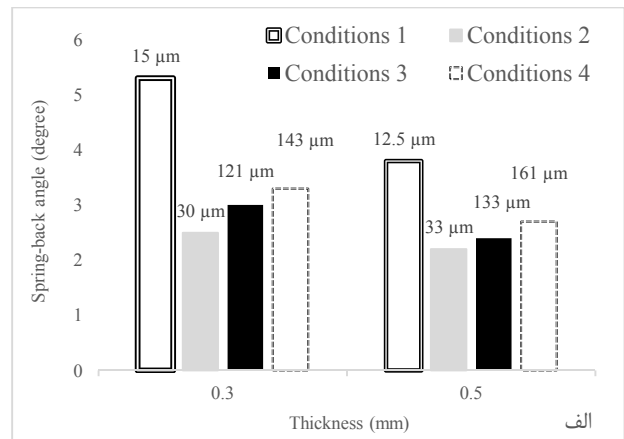


Fig. 9 Influence of sheet metal thickness and grain size on spring-back angle.

(a) Punch radius 0.3 mm (b) Punch radius 0.5 mm (c) Punch radius 0.8 mm.

شکل ۹ تأثیر ضخامت ورق و سایز دانه بر روی زاویه برگشت فنری (الف) شعاع سنبه ۰/۳ میلی‌متر (ب) شعاع سنبه ۰/۵ میلی‌متر (ج) شعاع سنبه ۰/۸ میلی‌متر

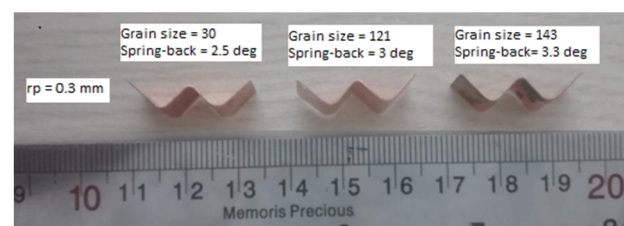


Fig. 10 Micro bending results - Experimental

شکل ۱۰ نتایج میکرو خمکاری - تجربی

^۱ Spring - go

جدول ۳ تأثیر ابعاد قالب بر زاویه برگشت فنری

Table 3 effect of die dimensions on the spring-back angle

شرایط ۴		شرایط ۳		شرایط ۲		شرایط ۱		شرایط آنیلینگ
دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۱۵۰ دقیقه		دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۹۰ دقیقه		دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۶۰ دقیقه		بدون آنیلینگ		شرایط آنیلینگ
0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	ضخامت ورق (mm)
161	143	133	121	33	30	12.5	15	سایز دانه (μm)
1	1.72	1.3	1.95	1.5	2.8	2	3.4	برگشت فنری - میکرو
-3	-3.4	-3.6	-4	-4	-4.8	-4.7	-5.2	برگشت فنری - ماکرو

۱- با افزایش دما از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان سیکل عملیات آنیلینگ، متوسط سایز دانه حدود ۴/۷ برابر افزایش داشته است.

۲- مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت ورق از ۰/۳ به ۰/۵ میلی‌متر، متوسط سایز دانه تحت شرایط عملیات آنیلینگ یکسان به میزان ۱۲ درصد افزایش داشته است.

۳- در نمونه‌های میکرو خمکاری شده با شعاع سنبه ۰/۳ میلی‌متر و شعاع ماتریس ۰/۳ میلی‌متر، میزان زاویه برگشت فنری برای ضخامت ۰/۳ میلی‌متر حدود ۳۵ درصد و برای ضخامت ۰/۵ میلی‌متر حدود ۲۳ درصد افزایش داشته است.

۴- بیشترین زاویه برگشت فنری برای سایز دانه ۳۳ میکرومتر و کمترین برای سایز دانه ۱۳۳ میکرومتر بدست آمده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی المان محدود بیان می‌کند که برای شرایط ضخامت و سایز دانه یکسان، با افزایش شعاع سنبه از ۰/۳ به ۰/۸ میلی‌متر، تنش فون میزز حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است.

۶- برای خمکاری ورق‌های آنیلینگ شده در مقیاس میکرو، پارامتر شعاع سنبه نقش اساسی داشته است و با کاهش آن زاویه برگشت فنری کاهش می‌یابد.

۷- نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به تأثیر شعاع ماتریس بیانگر این نکته است که بیشترین زاویه برگشت فنری مربوط به شعاع ماتریس ۰/۸ میلی‌متر و کمترین برای شعاع ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

۸- نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از شعاع‌های ماتریس بزرگ، رفتار برگشت فنری ورق میکرو خمکاری شده را به سمت پدیده رفتار برگشت فنری منفی سوق داده است.

۹- نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به تأثیر نسبت ضخامت به سایز دانه بیانگر این نکته است که بیشترین زاویه برگشت فنری مربوط به نسبت ۲۰ و کمترین برای نسبت ۳/۸ می‌باشد.

۱۰- حداکثر خطا بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی در پیش‌بینی زاویه برگشت فنری حدود ۱۸ درصد می‌باشد.

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش پارامترهای هندسی قالب خمکاری، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد که این مهم با تئوری‌های کلاسیک خمکاری ماکرو کاملاً سازگار است (شکل ۱۴)؛ زیرا براساس تئوری‌های کلاسیک خمکاری با ثابت بودن پارامترهای جنس و ضخامت ورق، با افزایش شعاع سنبه و ماتریس، زاویه برگشت فنری افزایش می‌یابد [۱۶]؛ همچنین رفتار برگشت فنری ورق بصورت رفتار برگشت فنری منفی مشاهده می‌شود.

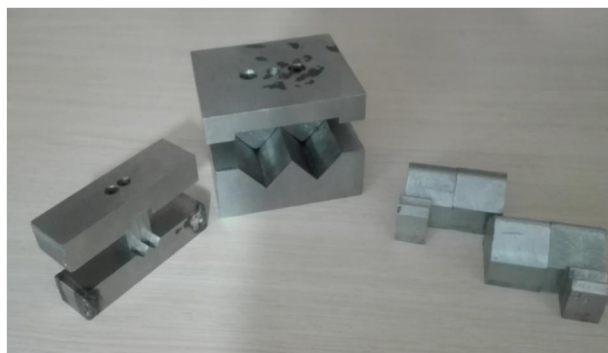


Fig. 13 Setup bending die with 4:1 ratio

شکل ۱۳ مجموعه قالب خمکاری با نسبت 4:1

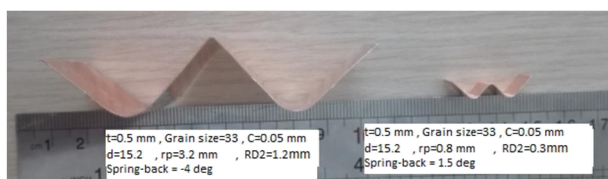


Fig. 14 Comparison of spring-back between micro and macro bending

شکل ۱۴ نتایج پدیده برگشت فنری میکرو و ماکرو

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر پارامترهای شعاع سنبه، شعاع ماتریس، ضخامت ورق، دما و زمان عملیات حرارتی، سایز دانه و نسبت ضخامت به سایز دانه بر پدیده برگشت فنری در یک قالب خمکاری جدید به شکل W مطالعه گردید.

برخی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش در ذیل آمده است:

[7] C. C. Chen, Experimental study on punch radius and grain size effects in V-bending process, *Material and Manufacturing Processes*, Vol. 29, No. 4, pp. 461-465, 2014.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880468>

[8] X. Liu, S. Zhao, Y. Qin, J. Zhao, A parametric study on the bending accuracy in micro W-bending using taguchi method, *Measurement*, Vol. 100, No. 1, pp. 233-242, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.007>

[9] G. kiswanto, A. mahmuda, D. Priadi, Preliminary investigation of micro V bending, *MATEC Web of conferences*, Vol. 108, 2017.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201710806001>

[10] X. Liu, X. Han, S. Zhao, Y. Qin, T. Yang, Optimization of micro W-bending process parameters using I-optimal design-based response surface methodology, *Manufacturing review*, Vol. 8, 2021.
<https://doi.org/10.1051/mfreview/2021005>

[11] C. Wang, S. Wang, S. Wang, G. Chen, Investigation on Spring-back Behavior of Cu/Ni Clad Foils during Flexible Die Micro V-Bending Process, *metals*, Vol. 9, No. 8, pp. 892-903, 2019.
<https://doi.org/10.3390/met9080892>

[12] N.A. Khamis, S.M. Zin, A.R. Bahari, Mild steel sheet metal forming using abaqus software, *Arpn Journal of Engineering and applied Sciences*, Vol. 11, No. 20, 2016.
<https://www.researchgate.net/publication/310510276>

[13] J.G. Liu, M.W. Fu, J. Liu, W.L. Chan, Influence of size effect on the spring back of sheet metal foils in micro-bending, *Computational Materials Science*, Vol. 50, No. 7, pp. 2604-2614, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.commsci.2011.04.002>

[14] J. Wang, M. Fu, J. Ran, Analysis of the size effect on spring-back behavior in micro-scaled U-bending process of sheet metals, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 16, No. 4, pp. 421-432, 2014.
<https://doi.org/10.1002/adem.201300275>

[15] W.D. Callister, D.G. Rethwisch. Fundamentals of materials science and engineering, *2nd ed. Wiley & Sons*, pp. 252-258, 2007.
<https://www.wiley.com/en-us>

[16] S. Thipprakmas, W. Phanitwong, Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using taguchi technique, *Mater Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 4430-4436, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.069>

۵- فهرست علائم

طول ساق ماتریس (mm)	LB
شعاع سنبه (mm)	rp
ضخامت ورق (mm)	t
کلیرنس یا لقی (mm)	C
شعاع مؤثر ماتریس (mm)	RD2
علائم یونانی	
زاویه دهانه سنبه (deg)	α
زاویه دهانه ماتریس (deg)	β

۶- مراجع

[1] Z. Tekiner, An experimental study of the examination of spring-back of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 1, pp. 109-117, 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.07.005>

[2] V. Esat, H. Darendeliler, M. I. Gokler, Finite element analysis of spring-back in bending of aluminium sheets, *Materials and Design*, Vol. 23, No. 2, pp. 223-229, 2004.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00062-0)

[3] I. karaagac, The evaluataion of process parameters on spring-back in V bending using the flexforming process, *Materials Research*, Vol. 20, No. 5, pp. 1291-1299, 2017.
<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0799>

[4] S. B. Chikalthankar, G. D. Belurkar, V. M. Nandedkar, Factors effecting on spring-back in sheet metal bending, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 2249-8958, 2014.
<https://www.researchgate.net/publication/332291075>

[5] X. Liu, S. Zhao, Y. Qin, C. Wan, Size the effects on spring-back of CuZn37 brass foils in tension and micro W-bending, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 105, No. 14, pp. 2439-2448, 2017.
<https://doi.org/10.1177/0954405417690557>

[6] K. Matsushita, T. Furushimak, T. Adak, Spring-in Behavior of Crystalline CFRTP Sheet after Thermal U-bending, *Procedia Engineering*, Vol. 184, No. 1, pp. 560-566, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.136>