



Experimental Investigation of the Electroplastic Effect on the Deep Drawing Process of Al5052 Square Cups

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khalili M.¹ MSc,
Bakhshi M.¹ PhD,
Gorji H.*¹ PhD

How to cite this article

Khalili M, Bakhshi M, Gorji H. Experimental Investigation of the Electroplastic Effect on the Deep Drawing Process of Al5052 Square Cups. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(10):2571-2581.

ABSTRACT

Research results performed by researchers have illustrated that applying electric current to a deforming metal can lead to a reduction in the required deformation force and an improvement in the formability. This technique is known as electrically assisted forming and is used in various forming processes. In this paper, the forming of square cups through electrically assisted deep drawing process was investigated experimentally and the effects of process parameters, including current magnitude, pulse frequency, and waveform (sinusoidal and square) on the forming force, thickness distribution, and drawing depth are examined. In this regard, after designing and preparing the test setup and forming square cups, the experimental results obtained were compared to those of the conventional deep drawing tests. The results showed that increasing the current magnitude leads to reducing the maximum thinning and the forming force in the deep drawing process of the formed parts. Furthermore, it was found that at a higher frequency, the deformation force decreases significantly and thickness distribution becomes more uniform. The comparison of the two waveforms of pulses demonstrated that the sinusoidal waveform has a relatively more significant effect on the reduction of the force and thickness distribution and a considerable effect on the drawing depth.

Keywords EAF; Electroplastic; Pulsed Electric Current; Deep Drawing; Square Cups

¹Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
Post Code 4714871167
Phone:-
Fax: -
hamidgorji@nit.ac.ir

Article History

Received: June 15, 2020
Accepted: August 24, 2020
ePublished: October 21, 2020

CITATION LINKS

[1] A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect [2] Formation of 5052 aluminum channels using electrically-assisted manufacturing (EAM) [3] Electrically assisted forming: Modeling and control [4] Thermo-mechanical investigations of the electroplastic effect [5] Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing [6] Numerical and experimental study on the effect of forming speed in gradient warm deep drawing process [7] Effect of electroplastic rolling on the ductility and superelasticity of TiNi shape memory alloy [8] Electroplasticity-assisted bottom bending process [9] Experimental investigation on electrically assisted cylindrical deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet [10] A process comparison of simple stretch forming using both conventional and electrically-assisted forming techniques [11] Experimental and numerical study of hydrodynamic deep drawing process of rectangular cups and blank shape optimization [12] Study on process parameters and its analytic application for nonaxisymmetric rectangular cup of multistage deep drawing process using low carbon thin steel sheet [13] Investigation of influence of direct-current pulses on springback during V-bending of AZ31B magnesium alloy sheet [14] Influence of cavity pressure on hydrodynamic deep drawing of aluminum alloy rectangular box with wide flange [15] An investigation of Forming through using the new method of ball deep drawing and comparing its thickness distribution and forming force with the conventional deep drawing [16] Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working [17] The application of the electro-plastic technique in the cold-drawing of steel wires

بررسی تجربی اثر الکتروپلاستیک در فرآیند کشش عمیق قطعات مربعی آلومینیوم AA5052

مهدی خلیلی MSc

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

محمد بخشی PhD

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

حمید گرجی* PhD

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

چکیده

نتایج پژوهش‌های صورت گرفته از سوی محققان نشان داده است که اعمال جریان الکتریکی به فلز در حین تغییر شکل می‌تواند منجر به کاهش نیروی مورد نیاز تغییر شکل و نیز بهبود شکل‌پذیری ماده شود. این روش، موسوم به شکل‌دهی به کمک الکتروسیسته است و در فرآیندهای مختلف شکل‌دهی استفاده می‌شود. در این مقاله، شکل‌دهی قطعات مربعی با استفاده از فرآیند کشش عمیق به کمک الکتروسیسته به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر پارامترهای فرآیندی شامل مقدار جریان، فرکانس پالس و شکل موج پالس (سینوسی و مربعی) بر نیروی شکل‌دهی، توزیع ضخامت و عمق کشش بررسی شده است. در این راستا، پس از طراحی و ساخت قالب و شکل‌دهی قطعه مربعی، نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با نتایج آزمایشگاهی فرآیند کشش عمیق سنتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داده است که افزایش مقدار جریان، منجر به کاهش حداکثر مقدار نازک‌شدگی و نیرو در فرآیند کشش عمیق قطعات شکل‌داده شده می‌شود. به علاوه، مشخص شد که در فرکانس بیشتر، نیروی شکل‌دهی کاهش قابل توجهی یافته و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌شود. از مقایسه دو شکل موج نیز مشاهده شد که شکل موج سینوسی اثر نسبتاً بیشتری بر کاهش نیرو و مقدار نازک‌شدگی و اثر قابل ملاحظه‌ای بر عمق کشش دارد.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی به کمک الکتروسیسته، الکتروپلاستیک، جریان پالسی، کشش عمیق، قطعات مربعی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

*نویسنده مسئول: hamidgorji@nit.ac.ir

مقدمه

با افزایش روزافزون حساسیت به موضوعات اقتصادی و مسایل زیست‌محیطی، صنایع خودروسازی و هوافضا توجه خود را به بهبود بهره‌وری سوخت معطوف کرده‌اند. یک راه‌کار اصلی برای دستیابی به این هدف، استفاده از آلیاژهای سبک‌وزن با استحکام بالا در طراحی خودروها و هواپیماها است. با این وجود، این آلیاژها به دلیل شکل‌پذیری پایین و استحکام تسلیم بالا، برای استفاده در روش‌های مرسوم شکل‌دهی و روش‌های ماشین‌کاری با چالش‌هایی نظیر افزایش زمان فرآیند، استحکام ناکافی و کاهش دقت ابعادی قطعات تولیدشده مواجه هستند^[1, 2]. به علاوه، در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، کم کردن تعداد مراحل بسیار قابل توجه است. در صنایع خاص همچون صنعت هوافضا،

به دلیل کم بودن تعداد قطعات تولیدشده و شکل‌پذیری پایین قطعات، هزینه ساخت قالب به طور قابل توجهی در قیمت تمام‌شده محصول تأثیرگذار است. از این رو، کم کردن تعداد مراحل بسیار با اهمیت است. روش شکل‌دهی به کمک الکتروسیسته، برخلاف روش‌های مرسوم شکل‌دهی ورق فلزی، به دلیل عدم نیاز به زمان اضافی، کیفیت بالای قطعات تولیدی و امکان دست‌یابی به نسبت کشش بیشتر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این روش، برای تولید در تعداد کم و قطعات خاص که دارای شکل‌پذیری پایین هستند، در مقایسه با فرآیندهای مشابه از نظر اقتصادی می‌تواند مقرون به صرفه باشد. در این روش، جریان الکتریکی به نمونه شکل‌دهی در طول تغییر شکل اعمال می‌شود و چند پدیده به طور همزمان در آن رخ می‌دهد که می‌تواند خواص مکانیکی فلز را اصلاح کند. در پدیده اول، برهم‌کنش مستقیم الکترون-نابه‌جایی، انرژی الکترون‌های عبوری از ماده را به نابه‌جایی‌ها انتقال می‌دهد و حرکت آنها را با تامین انرژی کافی برای غلبه بر موانع شبکه تسهیل می‌کند که به افزایش بیشتر تغییر شکل پلاستیک مواد کمک می‌کند. در پدیده دوم، اضافه کردن الکترون‌های اضافی (ناشی از اعمال الکتروسیسته) به میکروساختار فلز، منجر به شکست پیوندهای فلزی و آسان‌تر شکل گرفتن دوباره این پیوندها می‌شود و به بهبود شکل‌پذیری فلز کمک می‌کند. در پدیده سوم، افزایش دمای موضعی قطعه‌کار در اثر جریان الکترون‌ها باعث حرکت آسان‌تر نابه‌جایی‌ها به وسیله بهبود نفوذ می‌شود و مزایای شکل‌پذیری بیشتری را مهیا می‌کند. بنابراین ماده از مزیت شکل‌پذیری بیشتر برخوردار خواهد بود^[3].

شکل‌دهی به کمک الکتروسیسته یکی از انواع فرآیندهای شکل‌دهی است که دارای مزایایی مانند کاهش نیروی شکل‌دهی، افزایش تغییر شکل قابل دست‌یابی قطعه پیش از شکست و کاهش برگشت فنری است. از آنجا که این روش برگشت فنری را در قطعات شکل‌داده شده کم می‌کند، باعث افزایش دقت ابعادی قطعه نیز می‌شود. همچنین، در این روش انرژی الکتریکی می‌تواند بدون ایجاد وقفه در روند تغییر شکل، به قطعه‌کار اعمال شود. مزایای چندگانه حاصل از اعمال الکتروسیسته در مجموع به عنوان اثر الکتروپلاستیک شناخته می‌شود^[4]. اجزای اصلی مجموعه آزمایش در شکل‌دهی به کمک الکتروسیسته شامل یک منبع تغذیه قابل کنترل برای تولید الکتروسیسته، یک سیستم جمع‌آوری اطلاعات و عایق‌ها به منظور جداسازی قالب-قطعه‌کار از اجزای پرس در برابر الکتروسیسته اعمالی هستند^[3]. شکل ۱ شماتیک فرآیند کشش عمیق به کمک الکتروسیسته را نشان می‌دهد. در این روش جریان الکتریکی می‌تواند از نوع مستقیم (DC) یا متناوب (AC) و به صورت پیوسته یا پالسی به یک فرآیند اعمال شود. جریان پالسی می‌تواند در شکل موج‌های مختلف مانند سینوسی، مربعی یا دندان‌اره‌ای در مدت زمان روشنی پالس به کار رود^[1].

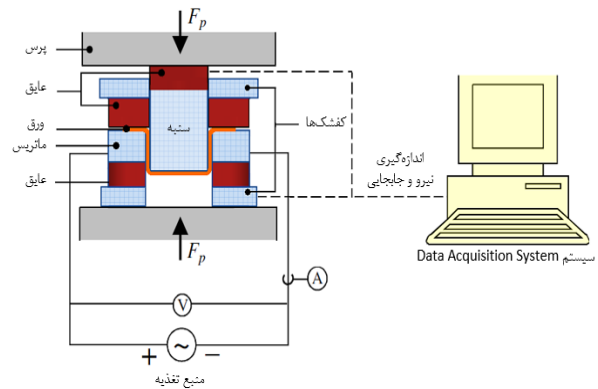
مقایسه با روش‌های مرسوم شکل‌دهی و روش خم‌کاری به کمک الکتریسیته با جریان پیوسته، به میزان قابل توجهی کمتر است.

ژی و همکاران^[9] فرآیند کشش عمیق استوانه‌ای به کمک الکتریسیته را برای ورق آلیاژ منیزیم AZ31B بررسی و اثرات حرارتی الکتریسیته بر خواص مکانیکی ماده را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پارامتر عمق کشش حدی را به عنوان یک معیار برای مقایسه بین نتایج در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که افزایش فرکانس جریان و پیک جریان در دمای یکسان (۴۰۰ کلوین) منجر به افزایش عمق کشش حدی می‌شود. همچنین دریافتند که دما نقش مهمی در بهبود عمق کشش حدی ورق منیزیم AZ31B در فرآیند کشش عمیق به کمک الکتریسیته ایفا می‌کند و موفق به افزایش عمق کشش از ۳ میلی‌متر در دمای اتاق به ۱۱/۵ میلی‌متر در دمای ۴۵۰ کلوین برای این آلیاژ شدند.

جونز و میز^[10] فرآیند شکل‌دهی انبساطی به کمک جریان الکتریسیته را برای نمونه‌های ورقی فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ بررسی کردند و اثرات اعمال الکتریسیته را بر روی خواص مکانیکی آن فلز مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که اعمال جریان الکتریکی به فرآیند شکل‌دهی انبساطی، تنش سیلان را کاهش می‌دهد. همچنین، با مدیریت حرارت نمونه در طول آزمایش، مشاهده کردند که با اعمال پالس الکتریکی، کاهش شکل‌پذیری نیز امکان‌پذیر است. به علاوه، دریافتند که محل اعمال جریان الکتریکی (از سنبه به ماتریس و از دو طرف ماتریس) و جهت جریان بر روی شکل‌پذیری و نیروی شکل‌دهی تأثیری نداشته است.

قطعات با سطح مقطع مستطیلی و مربعی دارای کاربرد روزافزونی در صنایع لوازم آشپزخانه، الکترونیک، خودرو سازی و غیره هستند. از جمله این قطعات می‌توان سینک ظرف‌شویی و محفظه روغن خودرو را نام برد^[11]. در این گونه قطعات نسبت به قطعات دوار، سطح تماس بیشتر ورق با ورق‌گیر در راستای قطری باعث افزایش اصطکاک و جریان ضعیف‌تر مواد به داخل حفره ماتریس شده که به کشش بیشتر ورق منجر می‌شود. در نتیجه احتمال پارگی در شعاع گوشه سنبه (راستای قطری) بیشتر از شعاع لبه سنبه (راستای طولی) است. از طرفی، رسیدن به عمق‌های بالاتر و گوشه‌های تیزتر در این قطعات کاری دشوار است و انجام آن با روش‌های سنتی (مانند عملیات کشش چندمرحله‌ای) با مشکلاتی همراه است^[12]. روش شکل‌دهی به کمک الکتریسیته با توجه به مزایای ذکر شده، از جمله روش‌هایی است که می‌تواند به عنوان یک راه‌کار مناسب برای رفع مشکل موجود در زمینه شکل‌دهی قطعات پیچیده مانند محصولات با سطح مقطع مربعی، مطرح شود.

در این مقاله، شکل‌دهی مقاطع مربعی ورق آلومینیوم AA5052 با استفاده از فرآیند کشش عمیق به کمک جریان پالسی به صورت تجربی انجام شد که تاکنون پژوهشی در این زمینه گزارش نشده است. اثر پارامترهای پالس الکتریکی (مقدار جریان، فرکانس پالس و شکل موج پالس) بر توزیع ضخامت و نیروی شکل‌دهی قطعه



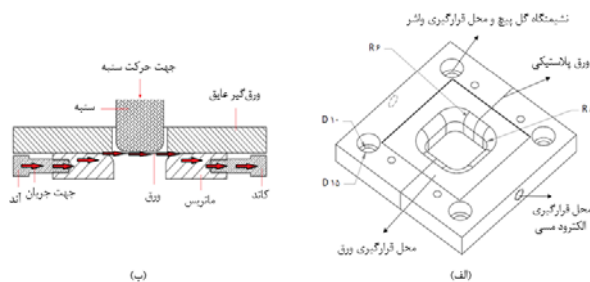
شکل ۱) شماتیک فرآیند شکل‌دهی (کشش عمیق) به کمک الکتریسیته

در زمینه شکل‌دهی گرم و داغ، بریمانی و رندی و حسینی‌پور^[5] در تحقیقات اولیه خود پارامترهای فرآیندی مختلفی را در فرآیند کشش عمیق گرم گردانی برای سرعت شکل‌دهی ثابت در محدوده دمایی محیط تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش دمای ناحیه لبه ورق، منجر به بهبود نسبت کشش حدی می‌شود. آنها در دمای شکل‌دهی ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به نسبت کشش حدی ۲/۸۳ دست یافتند. در پژوهشی دیگر، آنها اثر سرعت شکل‌دهی را در دماهای مختلف به صورت عددی بررسی کرده و با نتایج تجربی راستی‌آزمایی کردند^[6].

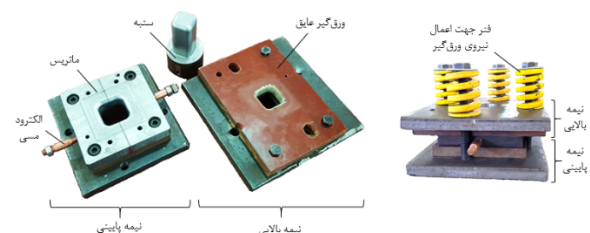
در زمینه شکل‌دهی به کمک الکتریسیته، تاکنون تحقیقات محدودی انجام گرفته است. ژو و همکاران^[7] به بررسی تجربی فرآیند نورد نوارهای آلیاژ حافظه‌دار TiNi به کمک الکتریسیته بدون عملیات حرارتی واسطه پرداختند. هدف از پژوهش آنها بررسی میزان بهبود شکل‌پذیری و تغییر شکل کلی از نظر کاهش ضخامت نوارها در پاس‌های مختلف فرآیند نوردکاری به کمک الکتریسیته بوده است. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش ضخامت آلیاژ TiNi به کمک پالس الکتریکی در طی یک پاس نورد می‌تواند به ۶٪/۲۱ برسد، در حالی که مقدار آن در فرآیند مرسوم نوردکاری تنها به ۱۰٪ محدود می‌شود. به علاوه، اُفت مشهود در نیروی جداکننده نورد در مقایسه با عملیات نورد ساده به عنوان اثر حرارتی و غیرحرارتی، به حرکت نابه‌جایی و انتشار اتم کمک می‌کند. آنها این روش را دارای مزایای منحصربه‌فرد برای فرآوری مواد با موم‌سانی کم و سخت شکل‌پذیر معرفی کردند.

ساجز/یگا و همکاران^[8] فرآیند خم‌کاری به کمک الکتریسیته در قالب V شکل را برای ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ و فولاد زنگ‌زن X5CrNi مورد بررسی قرار دادند. هدف از پژوهش آنها تحلیل اثرات غیرحرارتی الکتروموم‌سانی بوده است. با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که اثر پالس جریان بر فرآیند شکل‌دهی از یک ماده به ماده دیگر متفاوت است. به علاوه، فرآیند خم‌کاری به کمک الکتریسیته با پالس جریان کوتاه، فرآیندی امکان‌پذیر و بدون نیاز به تجهیزات پیچیده است. آنان همچنین دریافتند که نیروی خم‌کاری و توان مصرفی در این نوع روش به کمک الکتریسیته، در

الکتریکی بر بهبود شکل‌پذیری مواد مورد آزمایش، مناسب است. بنابراین آزمایش‌ها به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف در طول فرآیند، با پالس سینوسی انجام شده و در نهایت مقایسه‌ای بین این دو شکل موج انجام شده است. همچنین دمای نمونه در طول آزمایش اندازه‌گیری شد و از آنجا که افزایش دمای قابل توجهی مشاهده نشد، از آوردن مقادیر دما صرف نظر شد. در واقع با اعمال جریان پالسی اثرات غیرحرارتی الکتریسیته بر فرآیند کشش عمیق ورق آلومینیوم ۵۰۵۲ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲ (الف) شماتیک ماتریس استفاده‌شده (ابعاد به میلی‌متر)، (ب) مسیر حرکت جریان الکتریکی



شکل ۳ (الف) شماتیک ماتریس استفاده‌شده (ابعاد به میلی‌متر)، (ب) مسیر حرکت جریان الکتریکی

جدول ۱) مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه مربعی (ابعاد به میلی‌متر هستند)

پارامتر	مقدار
ابعاد سنبه	۳۰×۳۰
ابعاد حفره ماتریس	۳۳×۳۳
شعاع لبه سنبه و ماتریس	۸
شعاع گوشه سنبه و ماتریس	۶
فاصله بین محل قرارگیری ورق با ورق گیر	۰/۵

جدول ۲) ترکیب شیمیایی و درصد وزنی عناصر آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲

عناصر	مقدار
Al	پایه
دیگر مواد	حداکثر ۱۵/۰
دیگر مواد	حداکثر ۵/۰
Zn	مقدار کم
Cr	۰/۱۵
Mg	۲/۲
Mn	۰/۰۲
Cu	۰/۰۱
Fe	۰/۲۲
Si	۰/۰۸

مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، به دلیل نبود هیچ گونه مقایسه‌ای در زمینه اثر شکل موج پالس جریان الکتریکی اعمالی (مربعی یا سینوسی) بر فرآیند شکل‌دهی ورق فلزی، در این پژوهش با طراحی و ساخت یک منبع تغذیه DC که قابلیت اعمال هر دو شکل موج پالس مربعی و سینوسی را دارا است، امکان مقایسه نتایج حاصل از اعمال هر دو نوع پالس جریان فراهم شده است و نتایج حاصل از لحاظ توزیع ضخامت، نیروی مورد نیاز برای انجام فرآیند کشش عمیق و عمق کشش با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

مراحل آزمایشگاهی

مجموعه قالب استفاده‌شده از سنبه، ماتریس، عایق فیبر نسوز و کفشک‌های بالا و پایین تشکیل شده است. شکل ۲ شماتیک ماتریس قالب و مسیر حرکت جریان را نشان می‌دهد. به‌منظور جاری شدن جریان الکتریکی در راستای ضخامت ورق، ماتریس پس از مونتاژ در مجموعه قالب به دو قسمت مساوی با استفاده از مفتول ۲/۰ میلی‌متری با فرآیند وایرکات تقسیم شد و فضای خالی ایجادشده با یک لایه ورق پلاستیکی ۲/۰ میلی‌متری پر شد تا از جریان‌یافتن مواد به داخل آن در حین انجام فرآیند جلوگیری شود. همچنین برای جلوگیری از اتلاف جریان الکتریکی و افزایش اطمینان از انتقال جریان الکتریکی به ورق، از عایق‌ها به‌عنوان ورق‌گیر و بین سطوح قالب و فک‌های پرس استفاده شد. لازم به ذکر است که به دلیل ضرورت عایق‌بودن ماتریس از سایر اجزای قالب، مطابق شکل ۲-الف در نشیمن‌گاه گل‌پیچ که برای اتصال ماتریس به کفشک پایین ایجاد شده، واشرهای کائوچویی تعبیه شد. جهت اعمال نیروی ورق‌گیر از چهار فنر با سختی و ارتفاع یکسان استفاده شده است. تصویر واقعی مجموعه قالب در شکل ۳ و ابعاد هندسی اجزای اصلی قالب در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها به‌وسیله یک دستگاه آزمایش اونیورسال ۶۰۰ کیلو نیوتنی انجام شده است که توسط یک واحد کامپیوتری کنترل می‌شود و قابلیت تنظیم سرعت تا ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و ثبت نمودار نیرو-جابجایی را دارد.

ورق استفاده‌شده از جنس آلومینیوم AA5052 با ضخامت یک میلی‌متر است. نمونه‌های تهیه‌شده به ابعاد ۶۱×۶۱ میلی‌متر تحت عملیات حرارتی بازپخت در دمای ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و خنک‌کاری در کوره قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی و درصد وزنی عناصر آلیاژ مورد نظر در جدول ۲ ارایه شده است.

برای اعمال جریان پالسی در فرآیند کشش عمیق به‌کمک الکتریسیته، یک مولد پالس الکتریکی که قابلیت اعمال جریان پالسی تا ۵۰۰ آمپر را دارا است، به‌کار گرفته شده است. پارامترهای اصلی این دستگاه در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس نتیجه تری و همکاران^[۱۳] موج سینوسی می‌تواند اثر گرمایی کمتری نسبت به موج مربعی در یک دوره زمانی ایجاد کند که این موضوع برای کاهش اثرات حرارتی هنگام تحلیل تأثیر پالس‌های

نتایج و بحث

قطعه مربعی پس از آزمون و خطا برای یافتن نیروی ورق‌گیر مناسب تا عمق ۱۷ و ضخامت کمینه ۰/۸۶ میلی‌متر به‌صورت سالم شکل گرفت. در ناحیه فلنج هیچ گونه چروکیدگی و در دیواره و گوشه‌های قطعه گلویی مشاهده نشد. کیفیت سطح قطعه شکل‌داده‌شده نیز مطلوب بوده است. به‌منظور تعیین بهترین روش شکل‌دهی قطعه مربعی در عمق ۱۷ میلی‌متر مقایسه‌ای بین نتایج دو فرآیند کشش عمیق سنتی و کشش عمیق به‌کمک الکتریسته صورت گرفت. شکل ۶ قطعه شکل‌داده‌شده با روش کشش عمیق به‌کمک جریان پالسی را نشان می‌دهد. جهت مقایسه دقیق‌تر، توزیع ضخامت قطعات در دو راستای طولی و قطری و نمودار نیرو- جابه‌جایی سنبه مورد مقایسه قرار گرفتند.



شکل ۶) قطعه با سطح مقطع مربعی شکل‌داده‌شده با فرآیند کشش عمیق به‌کمک الکتریسته در جریان ۵۰۰ آمپر و عمق کشش ۱۷ میلی‌متر

بررسی تأثیر فرکانس

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند الکتروپلاستیک، فرکانس پالس است. به‌منظور بهبود توزیع ضخامت و دستیابی به فرکانس مناسب جهت شکل‌دهی قطعه تا عمق ۱۷ میلی‌متر به بررسی تأثیر مقادیر فرکانس ۸۰۶، ۴۴۶ و ۳۰۸ هرتز بر توزیع ضخامت و نیروی شکل‌دهی در طول فرآیند کشش عمیق به‌کمک الکتریسته در مقایسه با آزمون سنتی پرداخته می‌شود که در جدول ۴ شرایط این آزمون‌ها خلاصه شده است. دلیل انتخاب فرکانس‌های یادشده این است که زمان‌های خاموشی یک، ۲ و ۳ میلی‌ثانیه در دستگاه مولد پالس به‌عنوان متغیر و زمان روشنی پالس مقدار ثابت ۲۴۰ میکروثانیه انتخاب شد. شکل‌دهی قطعه مربعی در زمان‌های روشنی مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به اینکه تأثیری در بهبود توزیع ضخامت مشاهده نشد، مقدار آن ثابت در نظر گرفته شد. نمودارهای ۱ و ۲ به‌ترتیب نتایج حاصل از توزیع ضخامت قطعه‌ها را در دو راستای طولی و قطری نشان می‌دهد.

جدول ۴) شرایط آزمایش برای بررسی تأثیر فرکانس در طول فرآیند کشش عمیق به‌کمک الکتریسته در مقدار جریان ۵۰۰ آمپر، مدت زمان روشنی ۲۴۰ میکروثانیه و شکل موج سینوسی

شماره آزمایش	مدت زمان خاموشی پالس (ms)	فرکانس پالس (Hz)
یک	-	-
۲	۱	۸۰۶
۳	۲	۴۴۶
۴	۳	۳۰۸

برای انجام آزمایش‌ها، کابل‌های دستگاه مولد جریان مطابق شکل ۴ در الکترودهای مسی تعبیه شده در دو سمت ماتریس قرار داده می‌شوند تا اتصال دستگاه به مجموعه قالب ایجاد شود.

به‌منظور نشان‌دادن مزایای پالس‌های الکتریکی در طول کشش عمیق آلومینیوم، دو نوع آزمایش سنتی کشش عمیق و کشش عمیق با پالس‌های الکتریکی انجام شد. برای بررسی اثر جریان الکتریکی بر شکل‌دهی قطعه مربعی، آزمون‌های کشش عمیق شامل فرکانس جریان و پیک جریان متفاوت انجام شدند. تمام آزمایش‌ها با سرعت تغییر شکل ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و پس از ۱۷ میلی‌متر جابه‌جایی سنبه، متوقف شده‌اند. آزمایش‌ها با پارامترهای یکسان حداقل دو مرتبه تکرار شدند.

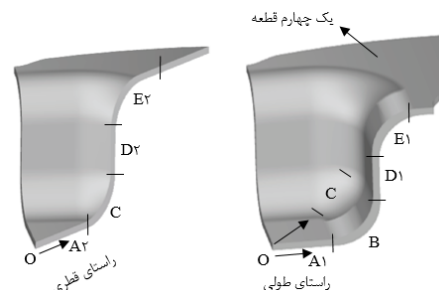
جهت تحلیل دقیق‌تر توزیع ضخامت، قطعه مورد نظر مطابق شکل ۵ به نواحی کف سنبه A1 و A2، شعاع لبه سنبه B، دیواره قطعه‌کار D1 و D2، شعاع لبه ماتریس E1 و E2 و ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه C (محل ایجاد حداکثر نازک‌شدگی) در راستای طولی و قطری تقسیم‌بندی شد (نقطه O مرکز قطعه‌کار است).

جدول ۳) پارامترهای جریان الکتریکی پالسی در دستگاه مولد پالس الکتریکی

پارامتر	مقدار
ولتاژ ورودی (V)	۲۲۰
نرخ جریان ورودی (A)	۱۰
ولتاژ خروجی (V)	۵ تا ۲۰
جریان (A)	صفر تا ۵۰۰
فرکانس خروجی (Hz)	۱۰۰ تا ۱۰۰۰
شکل موج	سینوسی مربعی
مدت زمان روشنی پالس (μs)	صفر تا ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۰۰
مدت زمان خاموشی پالس (ms)	یک تا ۱۰۰۰۰



شکل ۴) نمای مجموعه قالب عایق‌شده بر روی میز دستگاه آزمایش اونیورسال

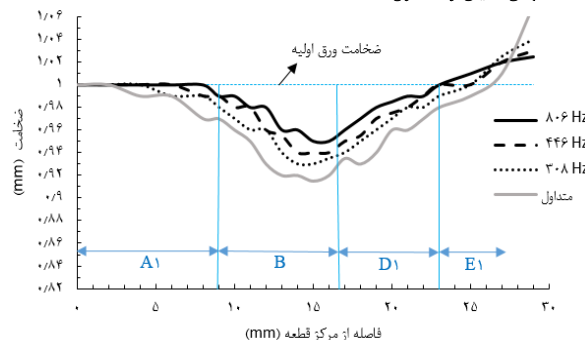


شکل ۵) ناحیه‌بندی قطعات برای بررسی توزیع ضخامت، A1 و A2 کف قطعه‌کار، B شعاع لبه سنبه، D1 و D2 دیواره قطعه‌کار، E1 و E2 شعاع لبه ماتریس، C ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه (محل ایجاد حداکثر نازک‌شدگی)

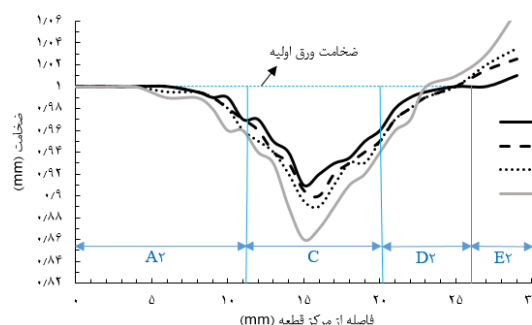
که بر اثر مواد اضافی در ناحیه فلنج ایجاد می‌شوند و هر چقدر جریان مواد به داخل قالب آسان‌تر باشد، این کرنش‌ها کوچک‌تر و افزایش ضخامت کمتر خواهد شد. از طرفی در حالت بدون جریان الکتریکی کاهش ضخامت در ناحیه کف سنبه بیشتر از حالت با جریان الکتریکی است و ماده نازک‌تر می‌شود. اما در ناحیه فلنج ضخامت قطعه بدون جریان الکتریکی بیشتر از حالت با جریان الکتریکی است که کاهش ضخامت در ناحیه کف را جبران می‌کند به گونه‌ای که حجم قطعه کار ثابت می‌ماند. در عین حال از آنجا که بررسی توزیع ضخامت در ناحیه‌های بحرانی بیشتر مد نظر بود، از این‌رو در قطعات شکل‌داده‌شده توزیع ضخامت تا انتهای قطعه اندازه‌گیری نشده و تا یک اندازه یکسان (به عنوان مثال تا انتهای ناحیه E1 یا E2 در شکل ۵) برای تمام قطعات اندازه‌گیری شده است.

با مقایسه نتایج در هر دو راستا (نمودارهای ۱ و ۲)، مشخص است که فرکانس ۸۰۶ هرتز نسبت به فرکانس‌های ۴۴۶ و ۳۰۸ هرتز کاهش ضخامت کمتری دارد، به طوری که مقدار نازک‌شدگی در فرکانس‌های ۸۰۶ و ۳۰۸ هرتز نسبت به آزمون سنتی به ترتیب ۳/۸۲ و ۱/۶۳٪ در راستای طولی و ۵/۸۱ و ۳/۴۸٪ در راستای قطری کاهش می‌یابد. مقدار کاهش ضخامت در ناحیه حداکثر نازک‌شدگی برای این آزمایش‌ها در دو راستای طولی و قطری در نمودار ۳ نشان داده شده است.

برای مطالعه بر روی نیروی شکل‌دهی، نمودارهای نیرو-جابه‌جایی سنبه به دست آمده از آزمایش‌های تجربی با یکدیگر مقایسه شده است (نمودار ۴). نیروی اعمال شده از طرف سنبه از دو نیروی شکل‌دهی و نیروی اعمال شده از طرف ورق‌گیر تشکیل شده است. نیروی شکل‌دهی به دلیل کارسختی در حین فرآیند افزایش می‌یابد اما نیروی ورق‌گیر به دلیل کاهش سطح مقطع ورق کاهشی است. در ابتدا آهنگ افزایش نیرو بر اثر کارسختی، بیشتر از آهنگ کاهش نیرو در اثر کاهش سطح مقطع ورق در زیر ورق‌گیر است. با افزایش کشش، آهنگ کاهشی نیرو زیاد شده و برابر با آهنگ افزایشی می‌شود. در این مرحله نیروی سنبه ثابت می‌ماند. پس از آن آهنگ کاهش نیرو از آهنگ افزایش نیرو بیشتر شده و نیروی سنبه کاهش می‌یابد. بنابراین در نمودار نیرو-جابه‌جایی مشاهده می‌شود که نیرو ابتدا افزایش یافته تا به مقدار بیشینه خود برسد و سپس نیرو کاهش می‌یابد^[15]. در نتیجه با اعمال جریان الکتریکی، به دلیل کاهش نیروی شکل‌دهی، حداکثر نیرو کاهش قابل توجهی را نسبت به نواحی دیگر از خودش نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودار ۴ ملاحظه می‌شود، اعمال جریان الکتریکی موجب کاهش نیروی سنبه، به ویژه مقدار بیشینه آن می‌شود، به طوری که نیروی بیشینه سنبه در حالت بدون جریان الکتریکی و فرکانس‌های ۳۰۸، ۴۴۶ و ۸۰۶ هرتز به ترتیب برابر ۱۸/۲۵، ۱۷/۳، ۱۶/۴۲ و ۱۵/۸۷ کیلونیوتن است. در مقایسه با حالت بدون جریان الکتریکی، فرکانس‌های یادشده به ترتیب ۶/۵، ۱۱/۳ و ۱۴/۳٪ کاهش نیروی بیشینه سنبه را نشان می‌دهند.

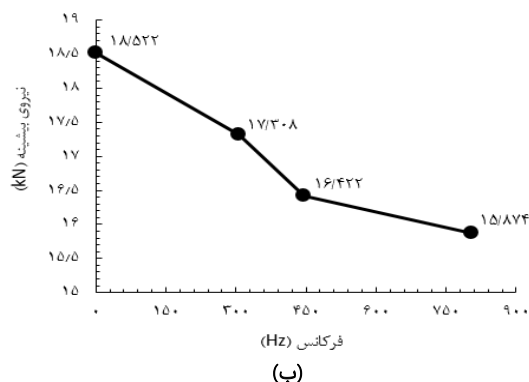
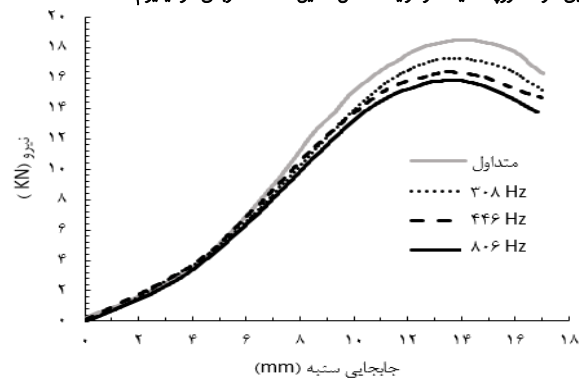


نمودار ۱) منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل‌داده‌شده در راستای طولی (از A1 تا E1 در شکل ۵) در مقدار جریان ۵۰۰ آمپر با شکل موج سینوسی، مدت زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس‌های ۸۰۶، ۴۴۶ و ۳۰۸ هرتز (معادل مدت زمان خاموشی پالس یک، ۲ و ۳ میلی‌ثانیه)



نمودار ۲) منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل‌داده‌شده در راستای قطری (از A2 تا E2 در شکل ۵) در مقدار جریان ۵۰۰ آمپر با شکل موج سینوسی، مدت زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس‌های ۸۰۶، ۴۴۶ و ۳۰۸ هرتز (معادل مدت زمان خاموشی پالس یک، ۲ و ۳ میلی‌ثانیه)

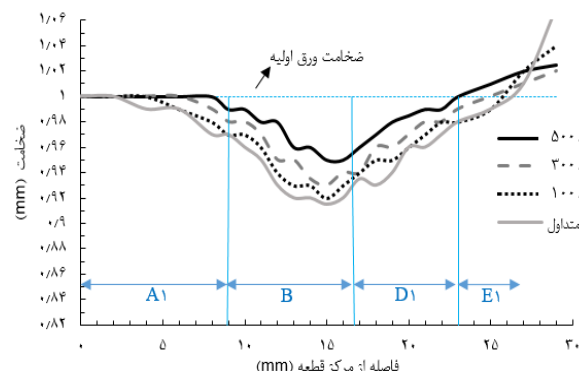
با بررسی نمودارهای به دست آمده و با توجه به شکل ۵، در ناحیه کف سنبه (ناحیه A1 و A2) با توجه به اینکه ورق با سنبه در تماس بوده و اصطکاک در این ناحیه بیشترین مقدار خود را دارد، در نتیجه از لغزش ورق در این ناحیه جلوگیری می‌شود و نازک‌شدگی کمترین مقدار خود را دارا است. از طرفی ناحیه شعاع گوشه سنبه در راستای قطری (ناحیه C) به دلیل خمش کششی ایجاد شده در ناحیه شعاع خم و اصطکاک بیشتر به دلیل تماس بیشتر ورق با ورق‌گیر و در نتیجه جریان کمتر مواد، حداکثر نازک‌شدگی را دارد. در راستای طولی، در ناحیه لبه سنبه (ناحیه B) به علت خمش ورق حول پروفیل سنبه کاهش ضخامت زیادی رخ می‌دهد. دیواره قطعه (ناحیه D1 و D2) نیز در طول فرآیند در اثر کشش ایجاد شده دچار نازک‌شدگی می‌شود اما در انتهای دیواره و در ناحیه E1 و E2 به علت وجود کرنش‌های فشاری، افزایش ضخامت اندکی ایجاد می‌شود^[14]. همچنین اعمال جریان منجر به حرکت ناهنجاری‌ها و جریان راحت‌تر مواد می‌شود^[7]. در نتیجه جریان راحت‌تر مواد، توزیع ضخامت همگن‌تر می‌شود و در ناحیه فلنج به دلیل جریان راحت‌تر مواد، افزایش ضخامت در حالت با جریان الکتریکی نسبت به حالت بدون جریان الکتریکی کمتر می‌شود. دلیل افزایش ضخامت، کرنش‌های فشاری جانبی هستند



نمودار ۴ (الف) منحنی نیرو- جابه‌جایی سنبه قطعات شکل‌داده‌شده در مقدار جریان ۵۰۰ آمپر با شکل موج سینوسی، مدت‌زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس‌های ۸۰۶، ۴۴۶ و ۳۰۸ هرتز (معادل مدت‌زمان خاموشی پالس یک، ۲ و ۳ میلی‌ثانیه)، (ب) مقایسه نیروی بیشینه در فرکانس‌های ۸۰۶، ۴۴۶ و ۳۰۸ هرتز

جدول ۵ (د) شرایط آزمایش برای بررسی تأثیر مقدار جریان اعمالی در طول فرآیند کشش عمیق به کمک الکتریسیته در مدت‌زمان روشنی ۲۴۰ میکروثانیه، شکل موج سینوسی و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت‌زمان خاموشی پالس یک میلی‌ثانیه)

شماره آزمایش	جریان (A)	فرکانس پالس (Hz)
۵	۵۰۰	۸۰۶
۶	۳۰۰	۸۰۶
۷	۱۰۰	۸۰۶



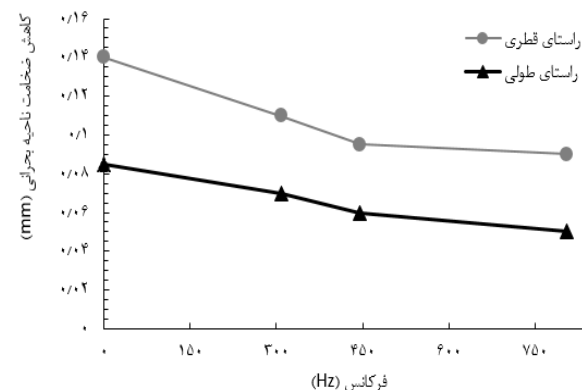
نمودار ۵ (د) منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل‌داده‌شده در راستای طولی (از A1 تا E1 در شکل ۵) در مقدار جریان‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر با شکل موج سینوسی، مدت‌زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت‌زمان خاموشی پالس یک میلی‌ثانیه)

این نوع واکنش به فرکانس‌های مختلف در مقدار جریان ثابت را می‌توان به دلیل افزایش سرعت برخورد الکترون‌ها در اثر افزایش فرکانس و در نتیجه افزایش انرژی آنها دانست که منجر به انتقال انرژی الکترون‌ها به ناهنجاری‌ها و حرکت آسان‌تر آنها می‌شود. از این‌رو، نازک‌شدگی کاهش پیدا می‌کند، توزیع ضخامت بهبود یافته و حداکثر نیروی شکل‌دهی قطعه کاهش می‌یابد [5].

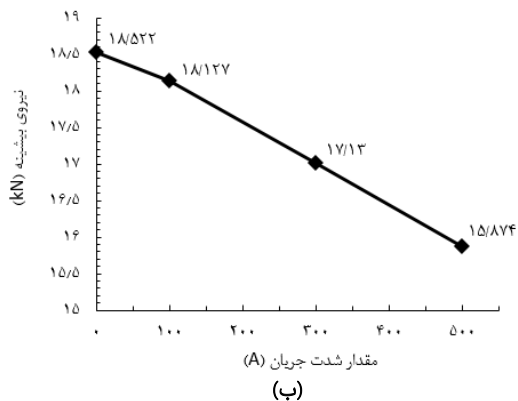
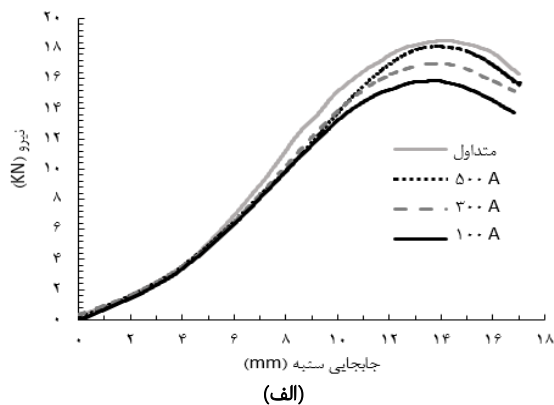
بررسی تأثیر مقدار جریان

در این بخش آزمایش‌های تجربی با استفاده از سه مقدار جریان مختلف (۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر) در شکل موج سینوسی با مقادیر ثابت زمان روشنی و فرکانس ثابت (مقدار مطلوب به‌دست‌آمده از نتایج آزمون قبلی) انجام شد و تأثیر مقادیر جریان متفاوت بر حداکثر نازک‌شدگی و نیروی شکل‌دهی در طول فرآیند، مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط آزمون‌ها در جدول ۵ لیست شده است.

نتایج حاصل از توزیع ضخامت آنها در دو راستای طولی و قطری به ترتیب در نمودارهای ۵ و ۶ نشان داده شده است. با مقایسه نمودارها می‌توان ملاحظه نمود که به‌طور کلی، اعمال جریان الکتریکی منجر به یکنواختی بیشتر و کاستن از میزان کاهش ضخامت در قطعه نسبت به آزمون بدون جریان الکتریکی می‌شود و هر چه مقدار جریان بیشتر شود، کاهش ضخامت کمتری در قطعه رخ می‌دهد. در آزمایش با مقدار جریان ۱۰۰ آمپر، توزیع ضخامت در نمونه تقریباً نزدیک به نمونه آزمایش بدون جریان الکتریکی است. با افزایش مقدار جریان به ۳۰۰ آمپر، کاهش ضخامت در قطعه کمتر می‌شود و این اثر مثبت، در آزمایش با جریان ۵۰۰ آمپر به بیشترین مقدار می‌رسد، به‌طوری‌که مقدار نازک‌شدگی نواحی بحرانی در مقادیر جریان ۵۰۰ و ۱۰۰ آمپر نسبت به قطعه شکل‌داده‌شده بدون جریان الکتریکی به ترتیب ۳/۸۲٪ و ۱٪/۰۹٪ در راستای طولی و ۵/۸۱٪ و ۴/۶۵٪ در راستای قطری بهبود می‌یابد. مقدار کاهش ضخامت در ناحیه حداکثر نازک‌شدگی برای این آزمایش‌ها در دو راستای طولی و قطری در نمودار ۷ نشان داده شده است.



نمودار ۷ (ب) منحنی کاهش ضخامت ناحیه بحرانی در مقادیر فرکانس متفاوت در راستای طولی و قطری



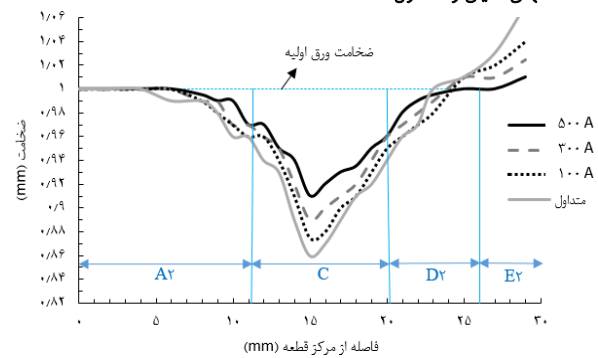
نمودار ۸ (الف) منحنی نیرو- جابه‌جایی سنبه قطعات شکل‌داده‌شده در مقادیر جریان‌های ۱۰۰ و ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر با شکل موج سینوسی، مدت‌زمان خاموشی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت‌زمان خاموشی پالس یک میلی‌ثانیه)، (ب) مقایسه نیروی پیشینه در مقدار جریان‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر

بررسی تأثیر شکل موج پالس

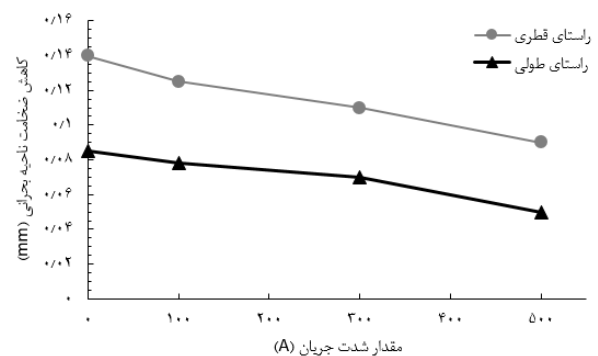
در این بخش آزمایش‌های تجربی، جهت مقایسه نتایج حاصل از اعمال پالس الکتریکی با شکل موج سینوسی و مربعی در طول تغییر شکل انجام می‌شود. جهت مقایسه دقیق‌تر آزمایش‌ها در دو جریان ۵۰۰ و ۳۰۰ آمپر در بهترین پارامترهای به‌دست‌آمده از نتایج آزمون‌های پیشین (مدت‌زمان روشن ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز) صورت گرفته است.

نمودارهای ۹ و ۱۰ به‌ترتیب نتایج ناشی از توزیع ضخامت آزمایش‌ها با جریان ۵۰۰ آمپر در دو راستای طولی و قطری را نشان می‌دهد. همچنین مقدار کاهش ضخامت در ناحیه حداکثر نازک‌شدگی برای این آزمایش‌ها در نمودار ۱۱ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نمودارها استنباط می‌شود که شکل موج سینوسی و مربعی تفاوت‌چندانی در توزیع ضخامت در دو راستا ندارند. از این‌رو می‌توان بیان کرد که تغییر شکل موج تأثیر قابل توجهی در کاهش ضخامت قطعه مربعی‌شکل‌داده‌شده ندارد.

نمودار ۱۲ منحنی نیرو- جابه‌جایی این آزمایش‌ها را در جریان ۵۰۰ آمپر نشان می‌دهد. می‌توان ملاحظه نمود که شکل موج سینوسی و مربعی تفاوت قابل توجهی را در حداکثر نیروی شکل‌دهی نشان نمی‌دهند و به‌طور کلی همانند نتایج حاصل از



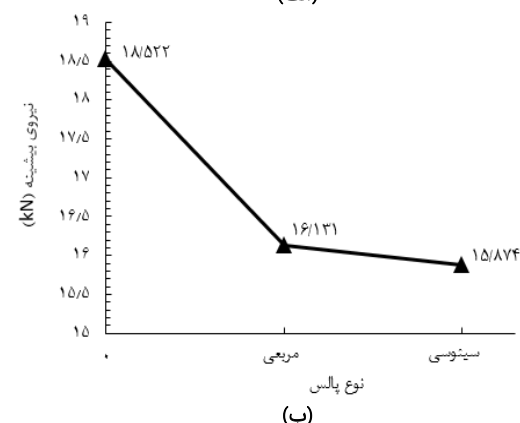
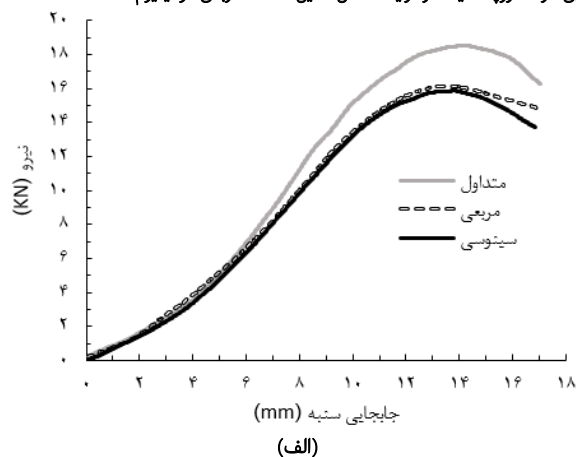
نمودار ۶ منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل‌داده‌شده در راستای قطری (از A2 تا E2 در شکل ۵) در مقدار جریان‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر با شکل موج سینوسی، مدت‌زمان روشن پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت‌زمان خاموشی پالس یک میلی‌ثانیه)



نمودار ۷ منحنی کاهش ضخامت ناحیه بحرانی در مقدار جریان‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر در راستای طولی و قطری

به‌منظور بررسی تأثیر مقدار جریان اعمالی بر نیروی شکل‌دهی قطعات، مقایسه‌ای بین نمودار نیرو- جابه‌جایی آزمایش‌ها صورت گرفت که در نمودار ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی با اعمال جریان الکتریکی حداکثر نیروی شکل‌دهی در مقایسه با آزمایش بدون جریان الکتریکی، کاهش می‌یابد. به‌علاوه با افزایش مقدار جریان این کاهش در حداکثر نیرو بیشتر می‌شود، به‌طوری که نیروی پیشینه سنبه در حالت بدون جریان الکتریکی و جریان‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ آمپر به‌ترتیب برابر ۱۸/۵۲، ۱۸/۱۲، ۱۷/۰۱ و ۱۵/۸۷ کیلو نیوتن است. در مقایسه با حالت بدون جریان الکتریکی، جریان‌های یادشده به‌ترتیب ۲/۱۵، ۸/۱ و ۱۴/۳٪ کاهش نیروی پیشینه سنبه را نشان می‌دهند.

در واقع جریان پالسی با شدت جریان بیشتر، انرژی مورد نیاز برای حرکت نابه‌جایی‌ها و غلبه بر موانع شبکه را فراهم می‌کند و به آنها اجازه می‌دهد تا بر موانع موجود در شبکه (عیوب سطحی در داخل شبکه، مانند حفره‌ها، ناخالصی‌ها، مرزدهانه‌ها و عیوب نقطه‌ای و خطی مانند جای خالی‌ها و نابه‌جایی‌ها) راحت‌تر غلبه کنند. بنابراین با کاهش مقاومت اصطکاکی داخلی و مقاومت تغییر شکل منجر به موم‌سانی و توزیع ضخامت بهتر می‌شود و تنش جریان و نیروی مورد نیاز شکل‌دهی کاهش می‌یابد [16, 17].



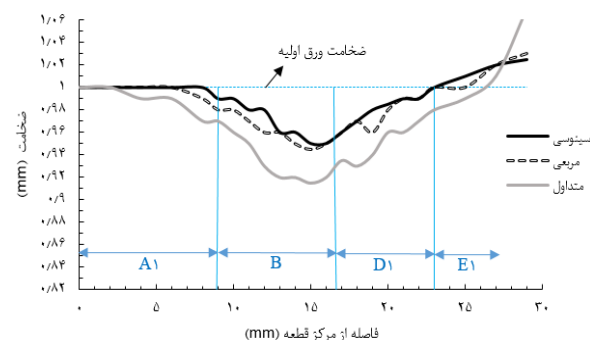
نمودار ۱۲ (الف) منحنی نیرو-جابجایی سنبه قطعات شکل داده شده در دو شکل موج سینوسی و مربعی با مقدار جریان ۵۰۰ آمپر، مدت زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت زمان خاموشی پالس یک میلی ثانیه)، (ب) مقایسه نیروی پیشینه در دو شکل موج سینوسی و مربعی در جریان ۵۰۰ آمپر

عمق کشش قابل دستیابی

یکی از مهم ترین پارامترهای موثر در کشش عمیق قطعات ورق، عمق کشش است. از آنجا که عمق کشش تا حدی درست قبل از شکست به طور مستقیم به ارزیابی شکل پذیری مواد می پردازد، در این بخش با تغییر ابعاد اولیه نمونه به ۶۵×۶۵ میلی متر، میزان حداکثر عمق کشش قطعات بدون ایجاد پارگی، در فرآیندهای کشش عمیق سنتی و کشش عمیق به کمک جریان الکتریسیته، مقایسه شده است. آزمایش ها با جریان پالسی در دو شکل موج سینوسی و مربعی و با مقادیر ثابت فرکانس و جریان به کارگرفته شده در آزمون پیشین، انجام شدند تا اثر نوع پالس نیز بر عمق کشش بررسی شود.

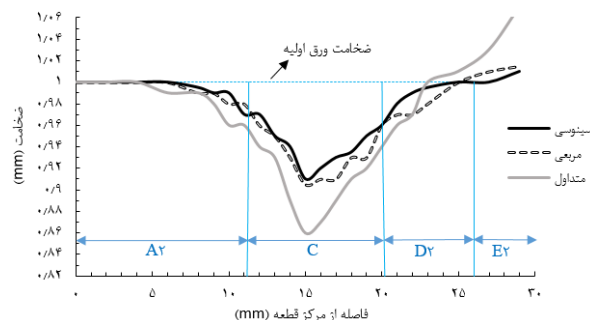
همان طور که در نمودار ۱۳ مشاهده می شود، نمونه در کشش عمیق سنتی تنها تا عمق $۱۱/۲۵$ میلی متر کشیده می شود و پس از آن دچار شکست می شود، در حالی که عمق کشش به کمک جریان پالسی با شکل موج مربعی به $۱۳/۳۵$ میلی متر افزایش پیدا می کند که نشان دهنده افزایش $۱۸/۶\%$ است. به علاوه علی رغم انتظاری که می رود، قطعه به کمک جریان پالسی با شکل موج سینوسی به صورت کامل کشیده می شود که نشان دهنده افزایش قابل توجه

توزیع ضخامت، شکل موج سینوسی رفتار نسبتاً بهتری را نسبت به شکل موج مربعی دارد.

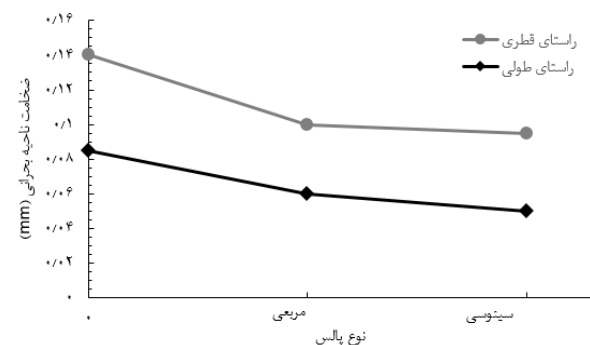


نمودار ۹ منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در راستای طولی (از A1 تا E1 در شکل ۵) در دو شکل موج سینوسی و مربعی با مقدار جریان ۵۰۰ آمپر، مدت زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت زمان خاموشی پالس یک میلی ثانیه)

به علاوه جهت بررسی دقیق تر، این مقایسه در جریان ۳۰۰ آمپر نیز صورت گرفت که به دلیل نتایج مشابه از آوردن آن صرف نظر شد. همچنین، پیش بینی می شود که این بهبود نتایج حاصل از شکل موج سینوسی در مقادیر جریان بالاتر به مراتب بهتر شود. در واقع نتایج نسبتاً بهتر شکل موج سینوسی می تواند به دلیل شیب موج یکنواخت تر نیروی اعمال شده به ناهنجاری ها نسبت به شکل موج مربعی توجیه شود که تا حدودی به افزایش بیشتر تغییر شکل پلاستیک مواد و شکل پذیری کمک می کند [13].

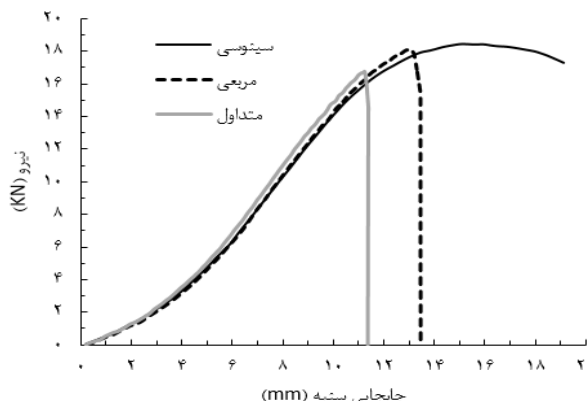


نمودار ۱۰ منحنی توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در راستای قطری (از A2 تا E2 در شکل ۵) در دو شکل موج سینوسی و مربعی با مقدار جریان ۵۰۰ آمپر، مدت زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز (معادل مدت زمان خاموشی پالس یک میلی ثانیه)



نمودار ۱۱ منحنی کاهش ضخامت ناحیه بحرانی در جریان ۵۰۰ آمپر با دو شکل موج سینوسی و مربعی در راستای طولی و قطری

عمق کشش نسبت به کشش عمیق سنتی است. شکل ۷ نمای قطعات کشیده شده را نشان می دهد.



نمودار (۱۳) منحنی نیرو-جابجایی سنبه قطعات شکل داده شده با ورق به ابعاد ۶۵×۶۵ میلی متر در دو شکل موج سینوسی و مربعی با مقدار جریان ۵۰۰ آمپر، مدت زمان روشنی پالس ۲۴۰ میکروثانیه و فرکانس ۸۰۶ هرتز



شکل (۷) نمونه های کشیده شده با ورق به ابعاد ۶۵×۶۵ میلی متر در حالت: (الف) بدون جریان با پارگی، (ب) شکل موج مربعی با پارگی، (ج) شکل موج سینوسی بدون پارگی

نتیجه گیری

شکل دهی قطعات با سطح مقطع مربعی از جنس آلومینیوم AA5052 با روش کشش عمیق به کمک جریان الکتریسته به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. با شکل دهی قطعه مربعی مورد نظر، تأثیر برخی از پارامترهای فرآیندی شامل فرکانس پالس، شدت جریان و شکل موج پالس بر توزیع ضخامت، بهبود رفتار مکانیکی این قطعات از لحاظ نیروی شکل دهی و شکل پذیری در مقایسه با قطعه حاصل از فرآیند کشش عمیق بدون جریان الکتریکی مطالعه شده است. نتایج زیر حاصل شد:

۱- با بررسی فرکانس پالس این نتیجه حاصل شد که با افزایش فرکانس پالس توزیع ضخامت بهبود یافته و حداکثر نازک شدگی

کاهش می یابد و افزایش فرکانس بر بیشینه نیروی شکل دهی نیز تأثیر مثبت داشته و منجر به کاهش حداکثر نیرو می شود.

۲- با بررسی شدت جریان این نتیجه حاصل شد که با افزایش مقدار جریان مقدار نازک شدگی در نواحی بحرانی بهبود می یابد و نیروی بیشینه مورد نیاز برای شکل دهی نیز کاهش پیدا می کند و شکل دهی قطعات آسان تر می شود.

۳- تغییر شکل موج پالس های الکتریکی (سینوسی و مربعی) تأثیر قابل توجهی بر توزیع ضخامت و حداکثر نیروی شکل دهی ندارد.

۴- در بررسی اثر اعمال جریان الکتریکی بر عمق کشش قطعات، قطعه مربعی به ابعاد مقطع ۳۲/۵×۳۲/۵ با شعاع گوشه ۸ و عمق کشش ۲۰ میلی متر به کمک جریان پالسی با شکل موج سینوسی در یک مرحله و به طور سالم، شکل داده شد. در حالی که بررسی ها نشان داد که در روش کشش عمیق سنتی، قطعه مورد نظر پس از عمق ۱۱/۲۵ میلی متر در ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه دچار پارگی می شود.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.

تعارض منافع: مقاله از پایان نامه کارشناسی ارشد مهدی خلیلی با عنوان بررسی تجربی اثر الکتروپلاستیک در فرآیند کشش عمیق قطعات مربعی تهیه شده در دانشگاه نوشیروانی بابل است و هیچ گونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: مهدی خلیلی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمد بخشی (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیگر آماری (۲۵٪)؛ حمید گرجی (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیگر آماری (۲۵٪).

منابع مالی: منابع مالی توسط دانشگاه نوشیروانی بابل تأمین شده است.

منابع

- 1- Ruszkiewicz BJ, Grimm T, Ragai I, Mears L, Roth JT. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017;139(11):110801-110815.
- 2- Salandro WA, Roth JT. Formation of 5052 aluminum channels using electrically-assisted manufacturing (EAM). *Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 4-7 October 2009, West Lafayette, United States. New York: ASME; 2009.
- 3- Salandro WA, Jones JJ, Bunget C, Mears L, Roth JT. *Electrically assisted forming: Modeling and control*. Berlin: Springer; 2015.
- 4- Salandro WA, Bunget C, Mears L. Thermo-mechanical investigations of the electroplastic effect. *Proceedings of the ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 13-17 June 2011, Corvallis, United States. New York: ASME; 2011.
- 5- Barimani Varandi A, Hosseiniipour SJ. Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by

- 12- Kang BS, Song WJ, Ku TW. Study on process parameters and its analytic application for nonaxisymmetric rectangular cup of multistage deep drawing process using low carbon thin steel sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010;49(9-12):925-940.
- 13- Xie H, Wang Q, Liu K, Peng F, Dong X, Wang J. Investigation of influence of direct-current pulses on springback during V-bending of AZ31B magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;219:321-327.
- 14- Meng B, Wan M, Yuan S, Xu X, Liu J, Huang Z. Influence of cavity pressure on hydrodynamic deep drawing of aluminum alloy rectangular box with wide flange. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013;77:217-226.
- 15- Gorji A, Mohammadian E, Mirzai MA. An investigation of Forming through using the new method of ball deep drawing and comparing its thickness distribution and forming force with the conventional deep drawing. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(4):159-166. [Persian]
- 16- Perkins TA, Kronenberger TJ, Roth JT. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007;129(1):84-94.
- 17- Tang G, Zheng M, Zhu Y, Zhang J, Fang W, Li Q. The application of the electro-plastic technique in the cold-drawing of steel wires. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998;4(1-3):268-270.
- gradient warm deep drawing. *Modares Mechanical Engineering*, 2014, 14(10):187-194. [Persian]
- 6- Barimani Varandi A, Hosseinipour SJ. Numerical and experimental study on the effect of forming speed in gradient warm deep drawing process. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2018;8(2):51-66.
- 7- Zhu RF, Tang GY, Shi SQ, Fu MW. Effect of electroplastic rolling on the ductility and superelasticity of TiNi shape memory alloy. *Materials & Design*. 2013;44:606-611.
- 8- Sanchez Egea AJ, Rojas HAG, Celentano DJ, Travieso-Rodríguez JA, Fuentes JL. Electroplasticity-assisted bottom bending process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(11):2261-2267.
- 9- Xie H, Dong X, Ai Z, Wang Q, Peng F, Liu K, et al. Experimental investigation on electrically assisted cylindrical deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;86(1-4):1063-1069.
- 10- Jones JJ, Mears L. A process comparison of simple stretch forming using both conventional and electrically-assisted forming techniques. *Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 12-15 October 2010, Erie, United States. New York: ASME; 2010.
- 11- Haghparast A, Gorji A, Bakhshi M, Alinejad GM. Experimental and numerical study of hydrodynamic deep drawing process of rectangular cups and blank shape optimization. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018;49(4):851-862. [Persian]