



بررسی تجربی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر بازگشت فنری در فرایند خم کاری ورق های فلزی

عرفان سورانی یانچشمه، امیناله محمدی*، عباس قائی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amin1@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۶ بهمن ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۸ فروردین ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

خم کاری ورق

بازگشت فنری

ارتعاشات فراصوتی

متمرکزکننده

شبیه سازی عددی

چکیده

در فرایند خم کاری ورق، بازگشت فنری در انتهای عملیات خم کاری باعث ایجاد خطا در هندسه قطعه کار می شود. یکی از روش های نوین برای کاهش میزان بازگشت فنری در عملیات خم کاری استفاده از ارتعاشات فراصوتی می باشد. در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر میزان بازگشت فنری، ابزار و متمرکزکننده فراصوتی برای عملیات خم کاری طراحی و ساخته شده است. ابتدا ابعاد متمرکزکننده با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه شده و سپس به کمک نرم افزار آباکوس شبیه سازی عددی انجام شده و موقعیت گره ارتعاشی در آن تعیین گردیده است. در نهایت بسامد تشدید مجموعه ساخته شده توسط دستگاه تحلیلگر امپدانس اندازه گیری شده است. نمونه هایی از جنس آلومینیوم Al3105 و Al6061 و همچنین فولاد CK65 در شرایط با و بدون ارتعاشات فراصوتی خم کاری شده و میزان بازگشت فنری اندازه گیری شده است. نتایج آزمایش های تجربی نشان می دهد که استفاده از ارتعاشات فراصوتی اثر قابل ملاحظه ای در کاهش بازگشت فنری تا ۵۸٪ در ورق های فولادی و تا ۲۹٪ در ورق های آلومینیومی داشته و تاثیر بیشتر بر روی جنس ها با استحکام تسلیم بالاتر داشته است.

Experimental investigation of ultrasonic vibrations' effect on springback in sheet metal bending process

Erfan Soorani Yancheshmeh, Aminollah Mohammadi*, Abbas Ghaei

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author's Email: amin1@iut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 4 February 2025

Accepted: 17 April 2025

Keywords:

Sheet Metal Bending

Springback

Ultrasonic Vibration

Concentrator

Numerical Simulation

Abstract

In the sheet metal bending process, springback at the end of the operation often leads to inaccuracies in the workpiece geometry. One innovative approach to reducing springback is the application of ultrasonic vibrations. In this research, an ultrasonic tool and concentrator for bending operation were designed and manufactured to investigate the effect of ultrasonic vibrations on springback. First, the concentrator dimensions were calculated using analytical relations, and numerical simulations were conducted using Abaqus software to determine the vibration node location. The resonant frequency of the constructed assembly was then measured using an impedance analyzer. Samples of aluminum Al3105 and Al6061, as well as CK65 steel, were bent both with and without ultrasonic vibrations, and the springback was measured. Experimental results demonstrated that ultrasonic vibrations reduce springback by up to 58% in steel sheets and 29% in aluminum sheets, with a more significant effect observed in materials with higher yield strength.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Soorani Yancheshmeh E, Mohammadi A, Ghaei A. Experimental investigation of ultrasonic vibrations' effect on springback in sheet metal bending process. 2025 Apr 21;12(2):70-81. doi: 10.22034/ijme.2025.502295.2044 [In Persian]

۱- مقدمه

خم کاری و شکل دهی ورق های فلزی یکی از پرکاربردترین روش ها برای تولید قطعات مورد نیاز صنایع خودروسازی است که مهمترین چالش آن کنترل و پیشبینی بازگشت فنری می باشد. پدیده بازگشت فنری پس از باربرداری و هنگام خروج قطعه کار از قالب رخ داده و باعث می شود شکل نهایی قطعه از شکل هدف فاصله بگیرد. میزان بازگشت فنری به توزیع تنش در انتهای مرحله شکل دهی وابسته است و انتظار می رود هر عاملی که بتواند تنش ها را در انتهای فرایند تغییر دهد، باعث تغییر میزان بازگشت فنری خواهد شد. استفاده از فناوری های جدید برای کاهش میزان بازگشت فنری همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. به طور مثال تاثیر میدان مغناطیسی بر کاهش بازگشت فنری توسط عیدی و همکاران [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که میدان مغناطیسی با افزایش استحکام ناحیه پلاستیک و تاثیر بر روی تنش ها باعث کاهش بازگشت فنری می شود. ارتعاشات فراصوتی نیز اگر به فرایند شکل دهی اضافه شود می تواند تنش ها را تغییر دهد [۲].

امروزه استفاده از ارتعاشات فراصوتی در فرایندهای مختلف ساخت و تولید از جمله شکل دهی فلزات مانند اکستروژن [۳] و برشکاری مواد [۴] گسترش چشمگیری یافته است. ارتعاشات فراصوتی بر روی خواص مکانیکی و ساختاری مواد تاثیر گذار است، به طوری که تاثیر اعمال ارتعاشات را می توان به دو دسته اثر حجمی و اثر سطحی تقسیم کرد. مهمترین اثر سطحی، کاهش اصطکاک بین مواد در اثر ارتعاش بوده و مهمترین اثر حجمی، کاهش تنش سیلان ماده می باشد. برآیند این عوامل می تواند باعث بهبود و کنترل خواص ساختاری ماده و کاهش نیروهای شکل دهی شود [۵].

یکی از اولین پژوهش ها برای بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر فلزات توسط لانگنکر [۶] انجام شده است. در این پژوهش که بر روی تک کریستال فلز روی انجام گرفت، مشاهده شد که تاثیر ارتعاشات فراصوتی مشابه با تاثیر افزایش دما و حرارت بر تنش تسلیم ماده است. انرژی امواج فراصوتی در محل نابجایی های ساختار ماده که تغییر شکل پلاستیک می یابد جذب شده و مقاومت ماده را کاهش می دهد. اما با افزایش دما و درجه حرارت، انرژی در تمام کریستال ماده جذب شده و در نتیجه برای رسیدن به مقدار مشابه استفاده از امواج فراصوتی، به انرژی بیشتری نیاز است. در تحقیق انجام شده توسط عابدینی و همکاران [۷] بر تاثیر ارتعاشات بر روی پودرهای آلومینیوم و آلیاژ تیتانیوم در مرز دانه ها تاکید شده است. در فرایند فشردن داغ پودر مهمترین منابع نابجایی، مرز دانه ها و ذرات پودر می باشد. اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب افزایش دما در محل نابجایی ها شده به طوری که با افزایش مقدار انرژی ارتعاشی انرژی بیشتری در نابجایی ها آزاد می شود و با افزایش دمای موضعی در این محل تنش سیلان ماده کاهش می یابد. مجموع این عوامل باعث افزایش چگالش و یکنواختی ساختاری در ماده شده که افزایش استحکام قطعه را به همراه دارد. تحقیقات کریستوفی [۸] روی آلیاژ آلومینیوم AA1100 بر تئوری برهم نهی تنش ها تاکید دارد. این فرضیه بیان می کند که با اعمال ارتعاشات فراصوتی در فرایند شکل دهی، تنش های فراصوتی به تنش های استاتیکی اضافه شده و برهم نهی این دو باعث تاثیر روی تنش سیلان ماده می شود.

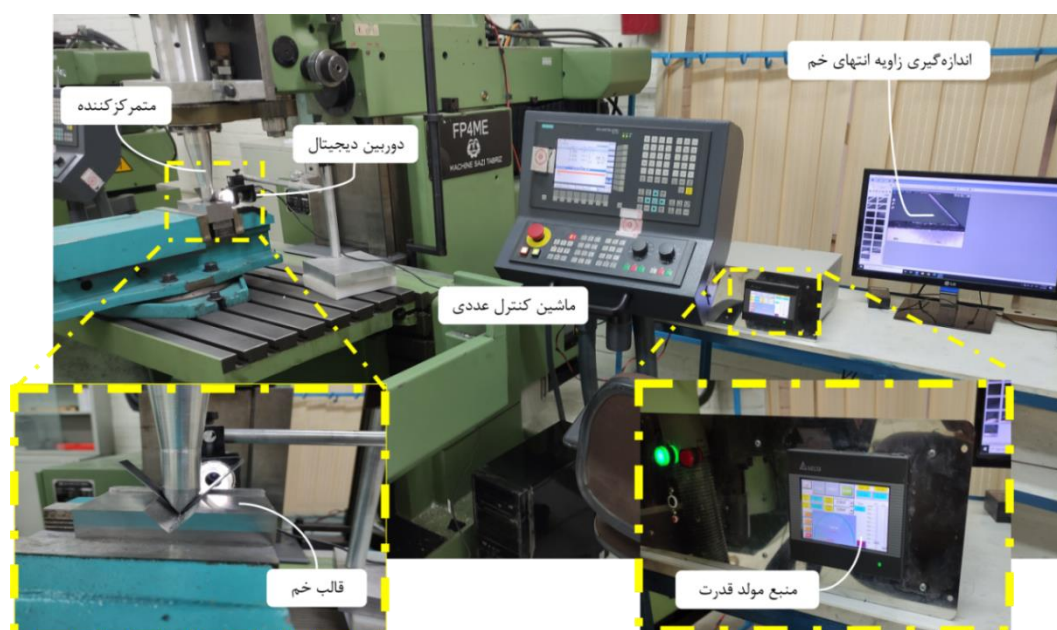
نتایج بدست آمده توسط شاو و همکاران [۲] نشان داد که امواج فراصوتی یک اثر موضعی بر روی نمونه آلیاژ مدل شده در تست کشش ایجاد می کند که منجر به توزیع غیریکنواخت دما و کرنش می شود. در این پژوهش مشاهده شد که اعمال ارتعاشات فراصوتی بلافاصله باعث کاهش تنش در نمودار تنش-کرنش شده و پس از قطع ارتعاشات تنش واقعی نمونه به سرعت افزایش می یابد. مقدار تنش پس از قطع ارتعاشات کمتر از قبل بوده که نشان دهنده باقی ماندن اثر نرم شوندگی فراصوتی در ماده می باشد. تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر آلیاژ Ti-6Al-4V توسط فرتاشوند و همکاران [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش اعمال ارتعاشات فراصوتی بر خواص مکانیکی ماده تاثیر گذار بوده و باعث بهبود رفتار پلاستیک و کاهش تنش تسلیم ماده شده است. همچنین ما و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر کاهش بازگشت فنری در فویل های تیتانیومی پرداختند. مشاهدات آن ها نشان داد که استفاده از ارتعاشات فراصوتی باعث کاهش ناحیه الاستیک و تغییر توزیع تنش در ناحیه خم کاری می شود.

طبق مطالعات انجام شده انتظار می رود که ویژگی های منحصر به فرد ارتعاشات فراصوتی بتواند باعث کاهش بازگشت فنری در فرایند خم کاری شود. هدف این پژوهش بررسی تاثیر پارامترهای ارتعاشات فراصوتی و ویژگی های نمونه ها در تاثیرپذیری از این پارامترها می باشد. در این پژوهش، ورق های فلزی با جنس های متفاوت در شرایط با و بدون ارتعاشات فراصوتی در شرایط یکسان خم کاری شده و میزان بازگشت فنری در هر دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ابزار خم کاری و متمرکزکننده فراصوتی طراحی و ساخته شده و ارتعاشات در حین فرایند خم کاری به نمونه ها اعمال شده است. موارد مورد بررسی در این پژوهش

تاثیر توان اعمالی ارتعاشات فراصوتی به نمونه ها و مدت زمان اعمال ارتعاشات به نمونه ها می باشد. علاوه بر آن با اعمال ارتعاشات به نمونه هایی با جنس متفاوت در شرایط یکسان مشاهده شد که استحکام تسلیم ماده یکی از پارامترهای اصلی در میزان تاثیرپذیری از ارتعاشات فراصوتی می باشد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از فرایند خم کاری گوه ای^۱ به منظور بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر میزان بازگشت فنری استفاده شده و تاثیر عوامل موثر بر فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. تکرار پذیری فرایند خم کاری و یکسان بودن شرایط انجام آزمایش برای تمامی نمونه ها نیازمند دقت حرکتی در مقدار و سرعت حرکت ابزار خم کاری می باشد. به این منظور برای ایجاد خم از دستگاه فرز کنترل عددی استفاده شده و برنامه حرکت ابزار برای دستگاه تعریف شده است. مجموعه ساخته شده مطابق شکل ۱ بر روی کله گی دستگاه فرز کنترل عددی نصب گردیده است. همچنین به منظور کنترل زاویه انتهای خم از دوربین دیجیتال استفاده شده و مطابق شکل ۱ زاویه انتهای خم پس از هر مرحله خم کاری، اندازه گیری شده است. در این مجموعه با استفاده از متمرکزکننده و منبع مولد قدرت، ارتعاشات فراصوتی ایجاد شده و به ناحیه خم انتقال داده می شود. ابزار مورد استفاده دارای هندسه V شکل بوده که به متمرکزکننده^۲ متصل می شود. جنس متمرکزکننده از آلومینیوم بوده که خواص آکوستیکی، استحکام و قابلیت ماشینکاری مناسب را دارد [۱۱]. ارتعاشات فراصوتی و کوبش ابزار در ناحیه خم کاری موجب بالا رفتن دما می شود. بنابراین لازم است ابزار فولادی مورد استفاده از استحکام مناسبی برخوردار باشد. جدول ۱ خواص مکانیکی آلومینیوم و فولاد مورد استفاده برای ساخت مجموعه متمرکزکننده و ابزار را نشان می دهد.



شکل ۱ سامانه فرایند خم کاری ورق به کمک ارتعاشات فراصوتی

جدول ۱ خواص مکانیکی آلومینیوم و فولاد

چگالی (Kg/m ³)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	جنس	قطعه
۲۸۱۰	۰/۳۳	۷۱/۷	Al 7075-T6	متمرکزکننده
۷۸۰۰	۰/۳	۲۰۰	St37	ابزار خم

¹ V bending Process

² Concentrator

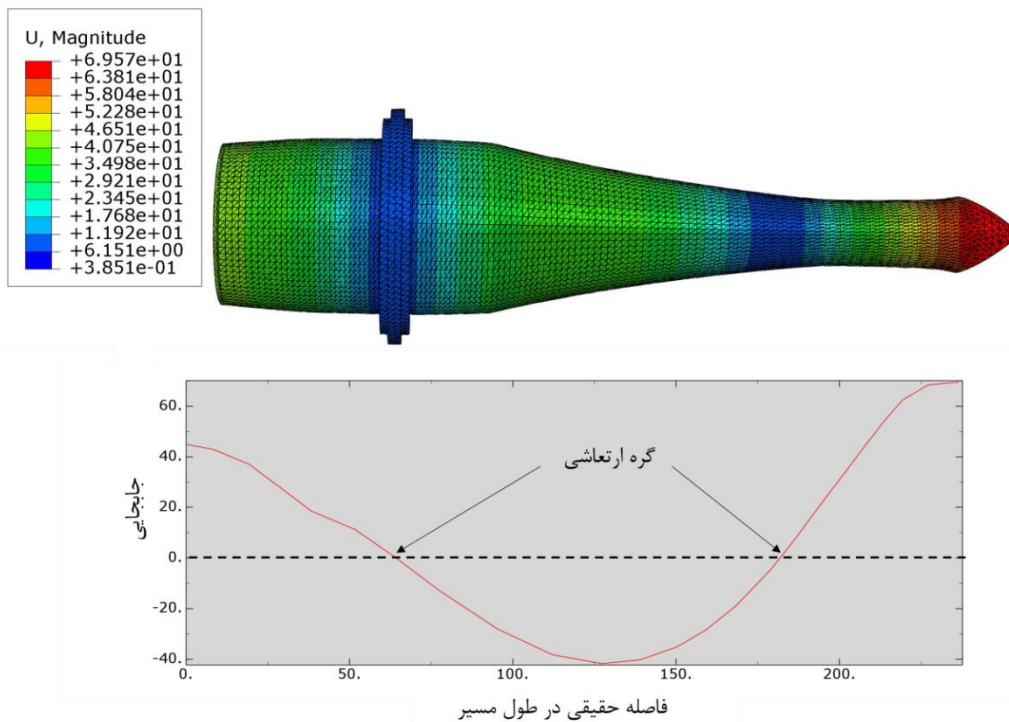
در طراحی مجموعه خم کاری، ابتدا طول اولیه با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه شده است. در این تحقیق متمرکزکننده با طولی به اندازه یک طول موج طراحی شده است. با توجه به جنس متمرکزکننده بر اساس جدول ۱ و بسامد کاری مبدل فراصوتی مطابق روابط ۱ و ۲ طول تخمینی متمرکزکننده محاسبه می شود [۱۲].

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 5015.98 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{5015.98}{20000} = 250.8 \text{ mm} \quad (2)$$

در تحلیل مودال مجموعه، می توان از این طول استفاده کرد و با تغییر اندازه ها به بسامد تشدید مورد نظر در شکل مد ارتعاشی طولی^۱ رسید. همچنین باید بزرگترین قطر متمرکزکننده از یک چهارم طول موج ارتعاش کوچکتر باشد. در غیر این صورت ارتعاشات عرضی ایجاد شده باعث کاهش بازدهی سیستم و افزایش دما مجموعه می شود [۱۳].

برای انجام تحلیل مودال از نرم افزار اجزا محدود آباکوس^۲ و گام بسامد^۳ استفاده شده و متمرکزکننده و ابزار خم به صورت سه بعدی با مشخصات جدول ۱ در این نرم افزار مدل سازی شده است. با استفاده از گام بسامد در بازه بسامد ۱۵ تا ۳۰ کیلوهرتز تحلیل انجام شده و شکل مد و بسامدهای طبیعی مجموعه در این محدوده بدست آمده است. برای دستیابی به مد ارتعاشی طولی در بسامد نزدیک به ۲۰ کیلوهرتز تغییرات لازم در طول و هندسه متمرکزکننده اعمال شده است. برای تعیین محل گیره بندی و گره ارتعاشی مطابق شکل ۲ نقطه ای که کمترین جابجایی نسبی را دارد، محل گره ارتعاشی و بهترین مکان برای اتصال متمرکزکننده به کله گی فرز می باشد.



شکل ۲ نتایج شبیه سازی عددی و تعیین موقعیت گره ارتعاشی در متمرکزکننده

المان های مورد استفاده در حل اجزا محدود دارای اندازه، درجه آزادی و تعداد گره متفاوت می باشند. به این منظور مدل سازی با اندازه المان و نوع المان متفاوت انجام شده است. مطابق جدول ۲ همگرایی مش و مستقل بودن نتایج شبیه سازی از نوع المان بررسی شده است، همچنین با کاهش اندازه المان تغییرات نتایج بسیار ناچیز است. بنابراین در این تحلیل از المان چهار وجهی ده گره ای با اندازه ۲

¹ Longitudinal Mode Shape

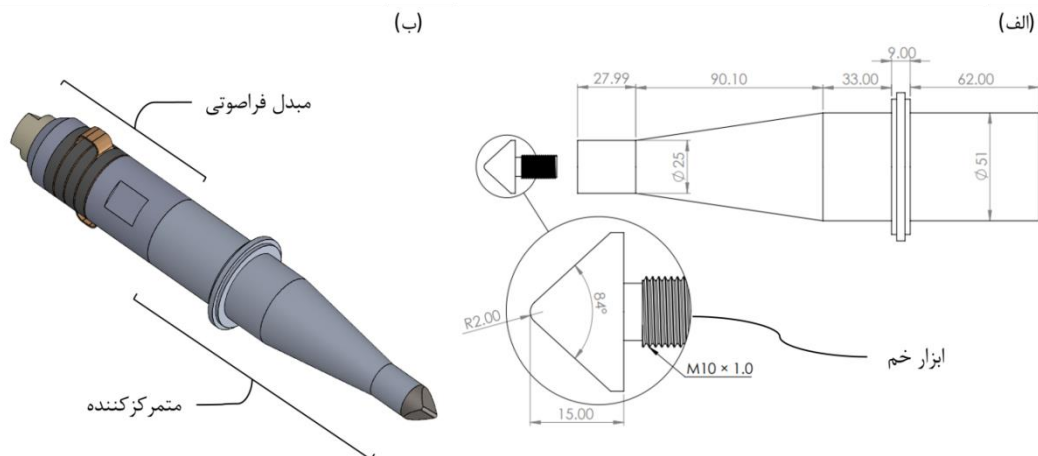
² Abaqus CAE

³ Frequency Step

میلی متر برای حل مسئله استفاده شده است. بر اساس شبیه سازی انجام شده در نرم افزار آباکوس ابعاد متمرکزکننده و ابزار خم مطابق شکل ۳-الف بدست آمده است. پس از ساخت متمرکزکننده و ابزار، مجموعه مطابق شکل ۳-ب به همراه مبدل فراصوتی مونتاژ شده و بسامد تشدید توسط دستگاه تحلیل گر امپدانس^۱ مدل PV520A مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از اندازه گیری بسامد مجموعه در شکل ۴ نشان داده شده است. اختلاف میان بسامد تشدید حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری عملی در اثر خطاهای ماشینکاری و وجود ناخالصی ها در ساختار ماده مورد استفاده می باشد. همچنین از میرایی و اتلاف انرژی بین سطوح تماس قطعات در تحلیل صرف نظر شده است که باعث تغییر در بسامد تشدید مجموعه می شود [۱۴].

جدول ۲ بررسی همگرایی نتایج و نوع المان مورد استفاده در شبیه سازی

شماره	اندازه المان (m)	تعداد المان	بسامد تشدید طولی (Hz)	نوع المان
۱	۰/۰۰۸	۵۳۳۷	۲۰۱۴۹	C3D4
۲	۰/۰۰۶	۱۰۳۸۱	۲۰۱۳۹	C3D4
۳	۰/۰۰۴	۳۱۵۳۱	۲۰۱۲۱	C3D4
۴	۰/۰۰۲	۱۹۷۹۱۰	۲۰۱۰۲	C3D4
۵	۰/۰۰۸	۵۳۳۷	۲۰۰۹۷	C3D10
۶	۰/۰۰۶	۱۰۳۸۱	۲۰۰۹۲	C3D10
۷	۰/۰۰۴	۳۱۵۳۱	۲۰۰۸۴	C3D10
۸	۰/۰۰۲	۱۹۷۹۱۰	۲۰۰۷۸	C3D10

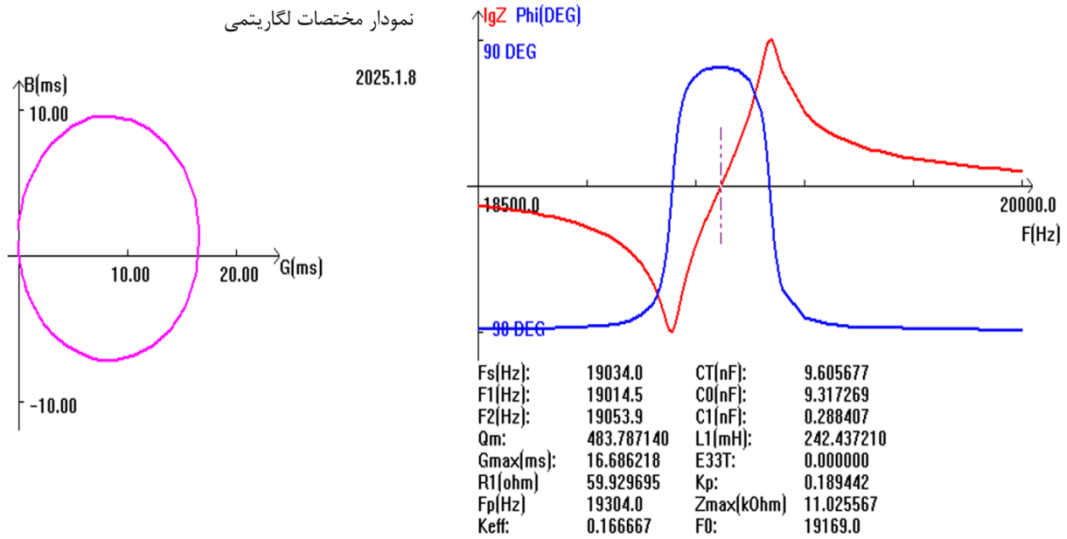


شکل ۳ الف) ابعاد حاصل از شبیه سازی عددی ب) مونتاژ مجموعه متمرکزکننده و ابزار خم

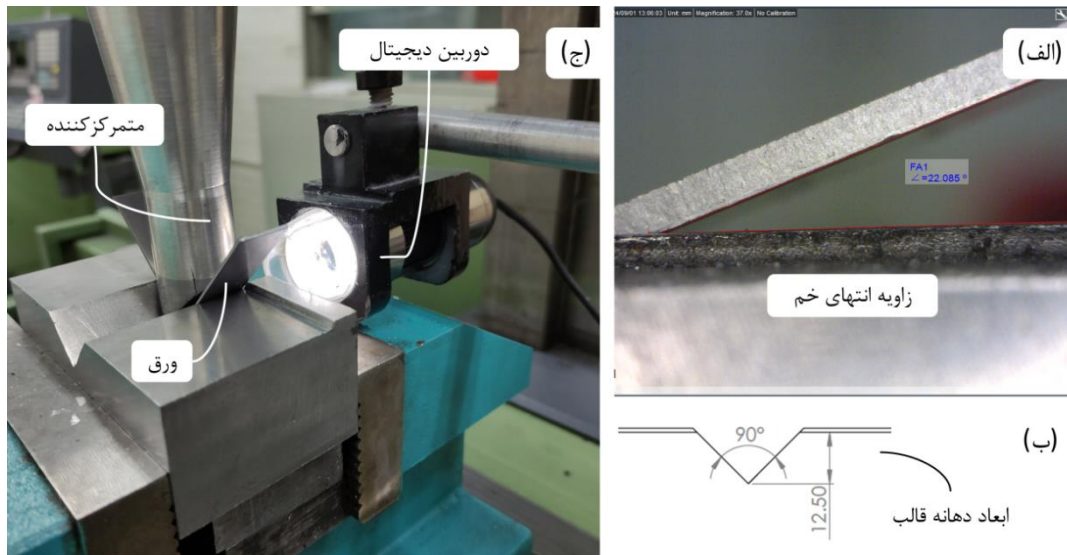
مطابق شکل ۵-الف به منظور اندازه گیری زاویه انتهایی خم، قالب خم فولادی با اندازه های مناسب بر اساس شکل ۵-ب طراحی و ساخته شده است. زاویه انتهایی فرایند خم کاری به ضخامت ورق، میزان پایین آمدن سنبه و شعاع خم بستگی دارد. برای اندازه گیری میزان بازگشت فنری، مطابق شکل ۵-ج با استفاده از دوربین دیجیتال مدل Dino-Lite، زاویه قطعه کار در انتهای فرایند خم کاری اندازه گیری شده و با زاویه قطعه کار پس از برداشتن سنبه مقایسه شده است. برای اندازه گیری زاویه پس از بازگشت فنری، مطابق شکل ۶-الف از دستگاه اندازه گیری ویدئویی^۲ مدل KIM-3020CU-IM، ساخت شرکت ARCS تایوان استفاده شده است. ابتدا در شرایط مختلف نمونه ها خم کاری شده و به منظور آزاد شدن تنش ها، اندازه گیری زاویه خم کاری ۲۴ ساعت پس از خم کاری ورق ها انجام شده است. در شکل ۶-ب نمایی از دستگاه مورد استفاده و محل قرارگیری نمونه ورق خم شده قابل مشاهده می باشد. سپس زاویه بدست آمده با زاویه انتهایی خم کاری مقایسه شده و میزان بازگشت فنری محاسبه می شود.

¹ Impedance Analyzer

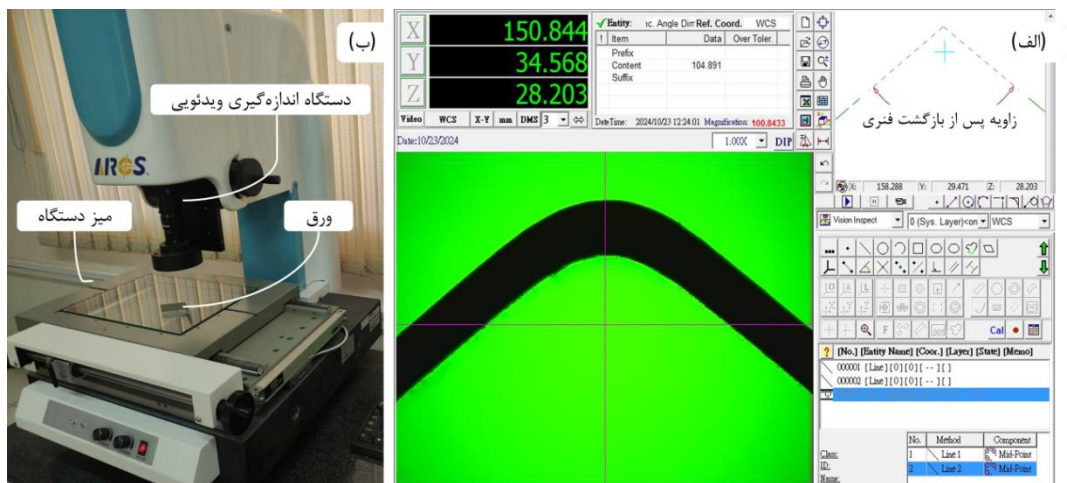
² Video Measuring Machine (VMM)



شکل ۴ نتایج اندازه گیری بسامد تشدید مجموعه توسط دستگاه تحلیل گر امیدانس



شکل ۵ الف اندازه گیری زاویه انتهای خم ب) ابعاد دهانه قالب خم کاری ج) مجموعه دوربین دیجیتال و قالب خم



شکل ۶ الف) اندازه گیری زاویه نمونه ها پس از بازگشت فنری ب) دستگاه اندازه گیری ویدئویی

نمونه های مورد استفاده، ورق فولادی CK65 و ورق های آلومینیومی Al3105 و Al6061 می باشند. برخی از خواص مکانیکی این نمونه ها در جدول ۳ قابل مشاهده است. به منظور تعیین دقیق نوع نمونه ها، آنالیز عناصر تشکیل دهنده نمونه ها با استفاده از دستگاه آنالیز لیزر مدل LIS-02 انجام شده است. جدول ۴ درصد عناصر تشکیل دهنده نمونه های آلومینیومی و فولادی را نشان می دهد. در صورتی که عرض ورق بیش از حد کوچک باشد، تنش عرضی قابل توجه بوده و باعث افزایش کرنش عرضی در ورق می شود. این امر موجب کاسه ای شدن کناره های ورق می شود [۱۵]. بنابراین عرض نمونه ۱۵ میلی متر و طول آن ۱۰۰ میلی متر می باشد.

جدول ۳ خواص مکانیکی نمونه ها

جنس ورق	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (Kg/m ³)
CK65	۲۱۰	۴۹۰	۷۸۵۰
Al3105	۷۰	۱۶۵	۲۷۲۰
Al6061	۶۸	۲۷۶	۲۷۰۰

جدول ۴ عناصر تشکیل دهنده نمونه ها با استفاده از دستگاه لیزر مدل LIS-02

جنس ورق	عناصر تشکیل دهنده							
	Cr%	Cu%	V%	Mo%	Mn%	Si%	Fe%	C%
CK65	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۲۷	۹۷/۸۷	۰/۶۳
Al3105	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۴۵	۰/۶۷	۰/۸۳	۰/۴۴	۹۷/۱۹
Al6061	۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۱۲	۱/۱۶	۰/۱۶	۰/۶۸	۰/۴۳	۹۶/۹۳

به منظور انجام آزمایش ها، ابزار خم کاری با استفاده از کنترلر دستگاه فرز در محل مناسب بالای قالب قرار گرفته و نمونه روی قالب قرار می گیرد. میزان پایین آمدن ابزار نسبت به سطح قالب و همچنین نرخ پیشروی ابزار برای خم کردن نمونه با استفاده از کنترلر دستگاه و برنامه تعریف شده برای حرکت مشخص می شود. یکی از متغیرهای فراصوتی که در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد، توان کاری مولد فراصوتی می باشد. همچنین تاثیر مدت زمان قرارگیری نمونه تحت ارتعاشات فراصوتی نیز در این پژوهش بررسی شده است. نمونه ها تا عمق مشخص خم شده و در انتهای خم مولد فراصوتی برای مدت مشخص روشن می شود. میزان بازگشت فنی در هر حالت اندازه گیری شده و تاثیر هر یک بر کاهش بازگشت فنی مشخص شده است. جنس نمونه خم کاری نیز یکی از متغیرهای تاثیرگذار در میزان بازگشت فنی می باشد. به منظور بررسی تاثیر جنس نمونه در فرایند از هر جنس در شرایط یکسان با و بدون ارتعاشات فراصوتی خم کاری انجام شده و میزان بازگشت فنی اندازه گیری شده است.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر توان ارتعاشات فراصوتی، خم کاری نمونه های آلومینیومی Al3105 با ضخامت ۱ میلی متر مطابق جدول ۵ در عمق ۷ میلی متر انجام شده است. مطابق شکل ۷-الف افزایش توان ارتعاش فراصوت تاثیر مستقیم بر کاهش بازگشت فنی دارد. به طوری که خم کاری در توان ۳۰۰ وات باعث کاهش ۴۴ درصدی بازگشت فنی نمونه Al3105 می شود. در مدلسازی انجام شده توسط یائو و همکاران [۱۶] بر روی آلومینیوم، دو پدیده نرم شوندگی آکوستیکی^۱ و سخت شدگی پسماند^۲ مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده نرم شوندگی در نواحی موضعی که مکانیزم تغییر شکل فعال است، هنگام اعمال ارتعاشات و سخت شدگی پس از برداشتن ارتعاشات رخ می دهد. مجموع این عوامل و همچنین تاثیر ارتعاشات بر کاهش ناحیه الاستیک [۱۰] موجب تغییر توزیع تنش در ناحیه خم کاری شده و باعث کاهش بازگشت فنی می شود. با افزایش توان و بیشتر شدن دامنه ارتعاش فراصوتی، میزان انتقال انرژی به نمونه ها افزایش می یابد. انرژی آکوستیکی انتقال یافته به نمونه توسط عیوب ساختار کریستالی ماده جذب شده و موجب افزایش دمای موضعی در موقعیت های مرز دانه ها می شود [۱۷].

¹ Acoustic Softening

² Acoustic Residual Hardening

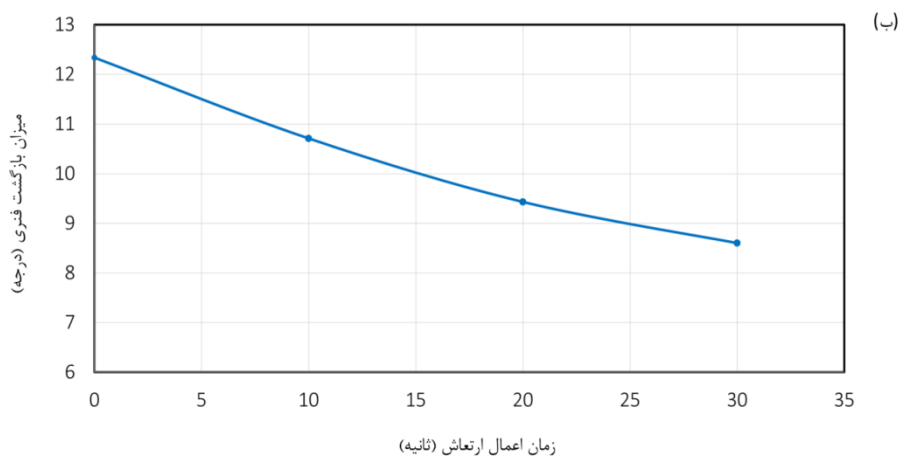
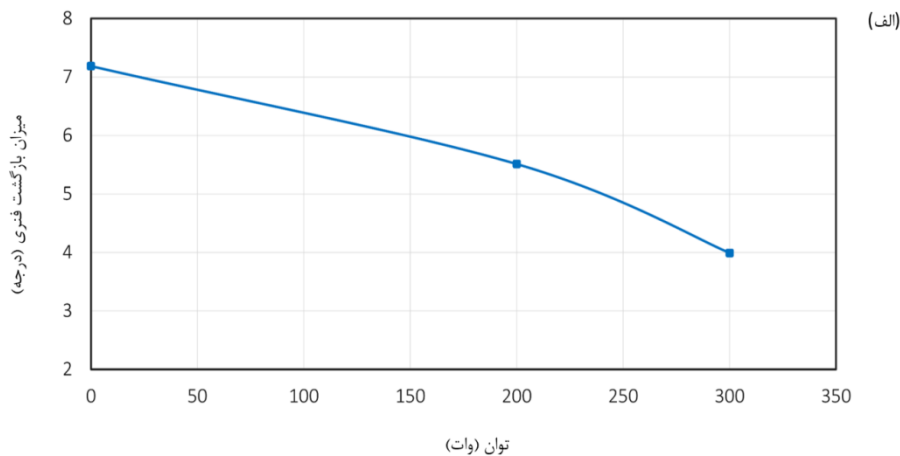
بررسی تاثیر مدت زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی بر کاهش بازگشت فنری، روی نمونه CK65 با ضخامت ۰.۵ میلی متر انجام شده است. در این آزمایش، خم کاری تا عمق ۷ میلی متر انجام شده و در انتهای خم به مدت زمان معین مطابق جدول ۶ ارتعاشات فراصوتی به نمونه ها اعمال شده است. افزایش مدت زمان اعمال ارتعاشات فراصوت باعث افزایش انرژی انتقال یافته به نمونه ها شده و در نتیجه دمای موضعی افزایش می یابد. در پژوهش های انجام شده اعمال ارتعاشات فراصوتی به مدت ۲۰ الی ۳۰ ثانیه باعث افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد شده است. علت این افزایش دما ایجاد حرارت موضعی در ناحیه ناپیوستگی ساختار ماده می باشد [۱۸]. در شکل ۷-ب تاثیر افزایش مدت زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی بر بازگشت فنری در نمونه ها نشان داده شده است.

جدول ۵ تاثیر توان فراصوت بر میزان بازگشت فنری در نمونه Al3105

شماره نمونه	توان (W)	بازگشت فنری (deg)	درصد کاهش بازگشت فنری
۱	-	۷/۲	-
۲	۲۰۰	۵/۵	٪۲۳
۳	۳۰۰	۴/۰	٪۴۴

جدول ۶ تاثیر زمان اعمال ارتعاشات فراصوت بر میزان بازگشت فنری در نمونه CK65

شماره نمونه	بازگشت فنری (deg)	درصد کاهش بازگشت فنری	زمان (s)
۱	۱۲/۳	-	-
۲	۱۰/۷	٪۱۳	۱۰
۳	۹/۴	٪۲۳	۲۰
۴	۸/۶	٪۳۰	۳۰

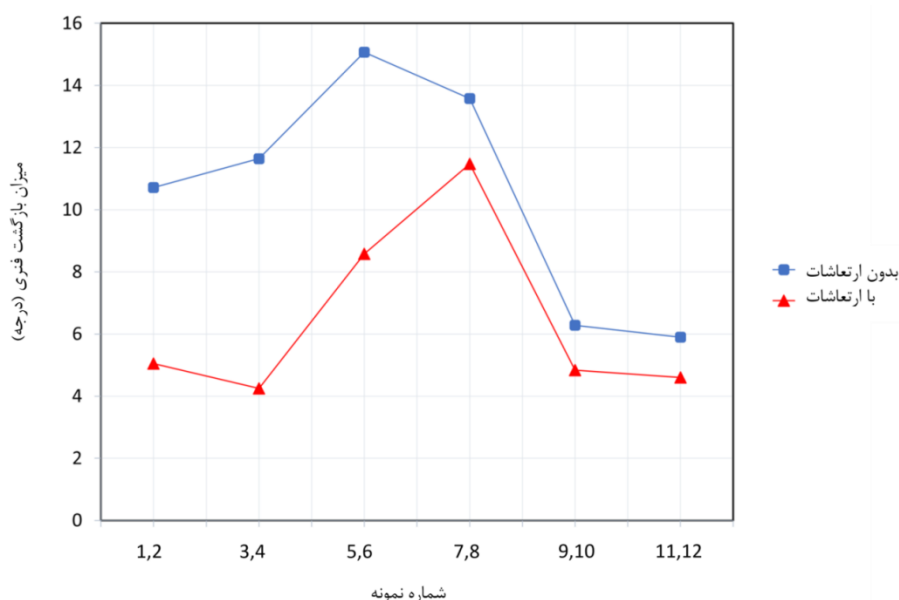


شکل ۷ الف) تاثیر توان ارتعاشات فراصوت بر میزان بازگشت فنری در نمونه Al3105 ب) تاثیر زمان اعمال ارتعاشات فراصوت بر میزان بازگشت فنری در نمونه CK65

به منظور بررسی اثر پذیری جنس های مختلف از ارتعاشات فراصوتی، خم کاری نمونه های CK65، Al3105 و Al6061 در شرایط یکسان، در حالت با و بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی انجام شده است. ضخامت نمونه ها ۱ میلی متر بوده و توان مولد فراصوتی برای خم کاری تمام نمونه ها ۱۵۰ وات می باشد. خم کاری نمونه های آماده شده از هر جنس در دو عمق ۷ و ۱۰ میلی متری انجام شده است. در جدول ۷ نتایج آزمایش و میزان بازگشت فنری برای نمونه های CK65، Al3105 و Al6061 آورده شده است. شکل ۸ میزان بازگشت فنری نمونه ها را مطابق جدول ۷ در شرایط با و بدون ارتعاشات فراصوتی نشان می دهد.

جدول ۷ تاثیر اعمال ارتعاشات فراصوتی بر میزان بازگشت فنری در نمونه های CK65، Al3105 و Al6061

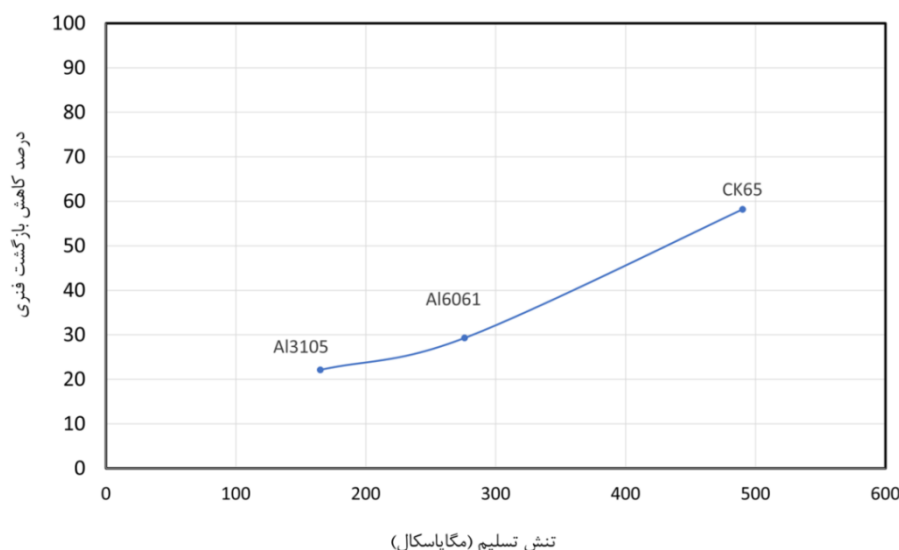
نمونه	جنس	زاویه نهایی (deg)	مقدار بازگشت فنری (deg)	شرایط ارتعاش فراصوت	عمق (mm)	مقدار کاهش بازگشت فنری	درصد کاهش بازگشت فنری
۱	CK65	۱۰۱/۳	۱۰/۷	بدون	۱۰	۵/۷	۵۲/۹
۲	CK65	۹۵/۶	۵/۱	با	۱۰	۵/۷	۵۲/۹
۳	CK65	۱۲۲/۵	۱۱/۶	بدون	۷	۷/۴	۶۳/۵
۴	CK65	۱۱۵/۱	۴/۲	با	۷	۷/۴	۶۳/۵
۵	Al6061	۱۱۰/۳	۱۵/۱	بدون	۱۰	۶/۵	۴۳/۱
۶	Al6061	۱۰۳/۸	۸/۶	با	۱۰	۶/۵	۴۳/۱
۷	Al6061	۱۲۸/۹	۱۳/۶	بدون	۷	۲/۱	۱۵/۵
۸	Al6061	۱۲۶/۸	۱۱/۵	با	۷	۲/۱	۱۵/۵
۹	Al3105	۱۰۴/۷	۶/۳	بدون	۱۰	۱/۴	۲۳/۰
۱۰	Al3105	۱۰۳/۲	۴/۸	با	۱۰	۱/۴	۲۳/۰
۱۱	Al3105	۱۲۴/۴	۵/۹	بدون	۷	۱/۳	۲۱/۶
۱۲	Al3105	۱۲۳/۲	۴/۶	با	۷	۱/۳	۲۱/۶



شکل ۸ مقایسه میزان بازگشت فنری نمونه های CK65، Al3105 و Al6061 در شرایط با و بدون ارتعاشات فراصوت

همانطور که مشاهده می شود در تمامی نمونه ها استفاده از ارتعاشات فراصوتی باعث کاهش بازگشت فنری نمونه ها می شود، اما میزان تاثیر پذیری هر جنس از ارتعاشات فراصوتی متفاوت است. به عنوان مثال در نمونه CK65 اعمال ارتعاشات فراصوتی در عمق ۱۰ و ۷ میلی متر به ترتیب باعث کاهش ۵۲،۹ و ۶۳،۵ درصدی بازگشت فنری می شود. شکل ۹ میانگین تاثیر ارتعاشات فراصوتی در کاهش

بازگشت فنری برای هر جنس مشخص از نمونه ها را نسبت به استحکام تسلیم آن جنس نشان می دهد. در فرایند شکل دهی فلزات با استفاده از ارتعاشات فراصوتی، انرژی حاصل از ارتعاشات در نمونه جذب می شود [۱۹]. با افزایش استحکام تسلیم نمونه میزان تاثیرپذیری آن از ارتعاشات فراصوتی بیشتر می شود. بر اساس پژوهش انجام شده در این زمینه علت این پدیده جذب انرژی بیشتر در مواد با استحکام تسلیم بالاتر از ارتعاشات فراصوتی می باشد [۲۰]. در مطالعه انجام شده توسط لانگ و همکاران [۲۱] مشاهده شده است که با افزایش تنش تسلیم ماده، میزان جذب انرژی فراصوتی و افزایش دمای موضعی بیشتر می باشد.



شکل ۹ میانگین درصد تاثیر ارتعاشات فراصوتی در کاهش بازگشت فنری بر حسب تنش تسلیم در نمونه های Al6061 و Al3105, CK65

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر ارتعاشات فراصوتی بر بازگشت فنری در فرایند خم کاری ورق های فلزی، مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اعمال ارتعاشات فراصوتی در حین فرایند خم کاری، مجموعه فراصوتی شامل متمرکزکننده و ابزار خم کاری طراحی و ساخته شده است. ابتدا ابعاد متمرکزکننده فراصوتی و ابزار خم کاری در بسامد مشخص با استفاده از روابط تحلیلی بدست آمده و شبیه سازی عددی با نرم افزار آباکوس انجام گردیده است. سپس با استفاده از دستگاه تحلیل گر امپدانس، بسامد تشدید این مجموعه اندازه گیری شده و مجموعه برای خم کاری نمونه ها با استفاده از دستگاه کنترل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی بازگشت فنری در شرایط با و بدون ارتعاشات فراصوتی بر روی ورق های آلومینیومی Al6061 و Al3105 و فولادی CK65 انجام شده است و نتایج زیر بدست آمده است:

- با افزایش توان ارتعاشات فراصوتی در فرایند خم کاری نمونه Al3105 میزان بازگشت فنری کاهش می یابد. به طوری که افزایش توان ارتعاشی تا ۳۰۰ وات باعث کاهش ۴۴ درصدی بازگشت فنری می شود. افزایش توان مولد باعث افزایش دامنه ارتعاشی شده و انرژی انتقال یافته به نمونه افزایش می یابد.
- افزایش مدت زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه CK65 تا ۳۰ ثانیه باعث کاهش ۳۰ درصدی بازگشت فنری می شود. افزایش زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب افزایش انرژی انتقال یافته به نمونه شده و ایجاد حرارت موضعی در ناحیه مرز دانه های ماده می شود.
- تاثیر ارتعاشات فراصوتی در نمونه ها با جنس متفاوت در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفته است. با اعمال ارتعاشات فراصوتی در فرایند خم کاری ورق فولادی CK65 به طور متوسط بازگشت فنری ۵۸ درصد کاهش یافته است و کاهش بازگشت فنری در نمونه های آلومینیومی Al6061 و Al3105 به ترتیب ۲۹ و ۲۲ درصد می باشد. در نمونه ها با استحکام تسلیم بالاتر، قابلیت جذب انرژی فراصوتی بیشتر بوده و میزان بازگشت فنری کمتر می شود.

فهرست علائم

C	سرعت موج در ماده (ms^{-1})
E	مدول الاستیسیته ($\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
f	بسامد ارتعاش (s^{-1})

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
λ	طول موج (m)

References

- [1] Eidi H, Zohourkari I, Rakhshkhorshid M. The use of magnetic field to reduce the spring back in bending of aluminum sheet 1050. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 20;11(1):15-27. doi: 10.22034/ijme.2024.434812.1912 [In Persian]
- [2] Shao G, Li H, Zhang X, Zou J, Huang Z, Zhan M. Modelling of ultrasonic vibration-assisted forming considering the distribution of ultrasonic field with structure deformation. International Journal of Plasticity. 2023 Nov 1;170:103744. doi: 10.1016/j.ijplas.2023.103744
- [3] Shahrokh R, Ghaei A, Farzin M, Ahmadi F. Experimental and numerical investigation of ultrasonically assisted micro-ring compression test. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018 Apr;95:3487-95. doi: 10.1007/s00170-017-1463-y
- [4] Javadian S, Moradi M, Mohammadi A, Mosaddegh P. Designing and manufacturing of the ultrasonic cutting tools for cutting of polymeric based composites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Apr 20;11(2):82-90. doi: 10.22034/ijme.2024.442180.1928 [In Persian]
- [5] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V. A Roadmap for application of high power ultrasonic vibrations in metal forming. Modares Mechanical Engineering. 2017 Jan 10;16(10):323-34. [In Persian]
- [6] Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals. IEEE transactions on sonics and ultrasonics. 1966 Mar;13(1):1-8. doi: 10.1109/T-SU.1966.29367
- [7] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V. Effect of ultrasonic on hot compaction of AA1100 and Ti-6Al-4V powders. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2017;3(3):1-12. [In Persian]
- [8] Kristoffy I. Metal forming with vibrated tools. Manufacturing Science and Engineering, 1969;91(4):1168-74. doi: 10.1115/1.3591766
- [9] Fartashvand V, Abdullah A, Vanini SS. Investigation of Ti-6Al-4V alloy acoustic softening. Ultrasonics Sonochemistry. 2017 Sep 1;38:744-9. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.07.007
- [10] Ma Z, Ma Q, Ye J, Zhang Y, He H, Chen F, Cao Z, Wang C. Application of combined process of holding pressure and ultrasonic vibration to control the springback behavior of pure titanium foils. Materials Today Communications. 2023 Dec 1;37:107193. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107193
- [11] El-Hofy H. Non-traditional and Advanced Machining Technologies. CRC Press; 2020 Aug 10.
- [12] Ensminger D, Stulen FB, editors. Ultrasonics: data, equations and their practical uses. CRC press; 2008 Dec 17. doi: 10.1201/9781420020205
- [13] Abdullah A, Shahini M, Pak A. An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer. Journal of Electroceramics. 2009 Jun;22:369-82. doi: 10.1007/s10832-007-9408-8
- [14] Mohammadi A, Abbasi Mobarakeh H, Khodakarami M. Investigation of material removal rate and surface quality of super clear crystal glass workpiece in the ultrasonic machining process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Mar 21;10(1):1-0. doi: 10.22034/ijme.2023.420276.1857 [In Persian]
- [15] Marciniak Z, Duncan JL, Hu SJ. Mechanics of sheet metal forming. 2nd ed. London: Butterworth-Heinemann; 2002.
- [16] Yao Z, Kim GY, Wang Z, Faidley L, Zou Q, Mei D, Chen Z. Acoustic softening and residual hardening in aluminum: Modeling and experiments. International Journal of Plasticity. 2012 Dec 1;39:75-87. doi: 10.1016/j.ijplas.2012.06.003
- [17] Eaves AE, Smith AW, Waterhouse WJ, Sansome DH. Review of the application of ultrasonic vibrations to deforming metals. Ultrasonics. 1975 Jul 1;13(4):162-70. doi: 10.1016/0041-624X(75)90085-2
- [18] Mignogna RB, Green Jr RE, Duke Jr JC, Henneke II EG, Reifsnider KL. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials. Ultrasonics. 1981 Jul 1;19(4):159-63. doi: 10.1016/0041-624X(81)90095-0

- [19] Bai L, Li Y, Yang M, Lin Y, Yuan Q, Zhao R. Modeling and analysis of single point incremental forming force with static pressure support and ultrasonic vibration. *Materials*. 2019 Jun 13;12(12):1899. doi: [10.3390/ma12121899](https://doi.org/10.3390/ma12121899)
- [20] Li Y, Chen X, Sun J, Li J, Zhao G. Effects of ultrasonic vibration on deformation mechanism of incremental point-forming process. *Procedia Engineering*. 2017 Jan 1;207:777-82. doi: [10.1016/j.proeng.2017.10.828](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.828)
- [21] Long Y, Li Y, Sun J, Ille I, Li J, Twiefel J. Effects of process parameters on force reduction and temperature variation during ultrasonic assisted incremental sheet forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Jul;97:13-24. doi: [10.1007/s00170-018-1886-0](https://doi.org/10.1007/s00170-018-1886-0)