



بررسی سمت و سوی کاربرد ارتعاشات توان بالای فراصوت در فرآیندهای شکل دهی فلزات

رضوان عابدینی¹، امیر عبدالله^{2*}، یونس علیزاده²، وحید فرتاشوند¹

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-4413، amirah@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 مرداد 1395

پذیرش: 16 شهریور 1395

ارائه در سایت: 24 مهر 1395

کلید واژگان:

شکل دهی فلزات

ارتعاشات فراصوت

تغییر شکل پلاستیک

ترانسدایسر فراصوت

چکیده

شکل دهی فلزات یکی از روش های سنتی ساخت قطعات است که در آن ماده به شکل ساده با تغییر شکل پلاستیک به صورت قطعات صنعتی در می آید. کاهش نیروهای شکل دهی و دستیابی به قطعات با کیفیت بهتر همیشه یکی از اهداف مورد نظر محققان و صنعتگران بوده است. به منظور نیل به این هدف در کنار روش های سنتی مانند افزایش دمای قطعه، روش های نوین نظیر اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوت نیز به کمک آمده اند. در این روش ارتعاشات توسط ترانسدایسر فراصوت تولید شده و به ناحیه تغییر شکل و تماس بین ابزار (یا قالب) و قطعه کار اعمال می شود. نتایج نشان می دهند که اعمال ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا با دامنه میکرونی موجب کاهش نیروهای شکل دهی، افزایش دقت ابعادی و عمر ابزارها و در نتیجه افزایش نرخ تولید و بهره وری می شوند. با توجه به اهمیت و کاربرد موضوع، در این مقاله به معرفی فرایند اعمال ارتعاشات فراصوت و پدیده های در پی آن پرداخته شده است. بر این اساس اصول علمی و تکنولوژیکی اعمال ارتعاشات فراصوت در کنار تأثیر آن بر فرایند و عوامل و مکانیزم های در ارتباط با آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. همچنین راه کارهای پیشبرد این فناوری در صنعت امروز و تجاری سازی آن به همراه خلاصه ای از مزایا و محدودیت های این فرایند در شکل دهی فلزات ارائه شده است.

A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming

Rezvan Abedini, Amir Abdullah*, Yunes Alizadeh, Vahid Fartashvand

Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, amirah@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 July 2016
Accepted 06 September 2016
Available Online 15 October 2016

Keywords:

Metal Forming
Ultrasonic Vibration
Plastic Deformation
Ultrasonic Transducer

ABSTRACT

Metal forming is a conventional manufacturing process whereby a material with simple form is subjected to plastic deformation and results in industrial end products. Reduction of forming forces and improving product quality has been a promising subject for investigators and artisans. For this purpose, primary methods such as increasing material temperature and modern methods such as use of high power low amplitude ultrasonic vibrations were introduced. In ultrasonic assisted forming, high power ultrasonic transducer produces low amplitude high frequency mechanical vibrations which were transmitted to material subjected to deformation and contacting surfaces of tool/workpiece. Results show reduction of forming forces and tool wear as well as improved surface integrity and dimensional stability that lead to increasing production rate and process efficiency. Considering the importance and capability of ultrasonic assisted metal forming, this paper is concerned with application of ultrasonic vibration on metal forming processes. To this purpose, fundamental principles and mechanisms of application of high power ultrasonic were introduced and discussed. Also, industrial future of this technology as well as its advantages, range of application and its restrictions were mentioned.

1-مقدمه

مستحکم و سنگین تر می شوند، همچنین در روش سنتی براساس مقاومت ماده در برابر تغییر شکل لازم است ابزارهای مورد استفاده از استحکام مکانیکی و مقاومت سایشی به مراتب بالاتری نسبت به قطعه برخوردار باشند. از این رو محققان به بررسی کاهش موقت استحکام ماده تحت تغییر شبکه منظور کاهش نیروهای شکل دهی ل پرداختند. افزایش دما معمول ترین روش بدین منظور است. در بسیاری از فرایندهای شکل دهی معمول امروز از افزایش دما برای کاهش نیروهای شکل دهی و بهبود شکل پذیری قطعات استفاده می شود. افزایش دما در یک قطعه مستلزم صرف انرژی برای تولید گرما و

یکی از پرکاربردترین روش های تولید بهره گیری از تکنولوژی شکل دهی است که در آن شکل نهایی با اعمال نیرو و با استفاده از ابزارهای سنتی با ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده اولیه تولید می شود. مهم ترین فرایندهای سنتی شکل دهی فلزات عبارتند از آهن گیری، کشش عمیق و کشش سیم و لوله. یکی از مهم ترین مسائل مورد تحقیق در زمینه شکل دهی فلزات کاهش نیروهای شکل دهی و دستیابی به دقت و پایداری ابعادی و هندسی بالای قطعات است. نیروهای بالای شکل دهی موجب نیاز به دستگاه های با ابعاد بزرگ تر و اجزای

Please cite this article using:

R. Abedini, A. Abdullah, Y. Alizadeh, V. Fartashvand, A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 323-334, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

هورن و ترانسدیوسر قرار می‌گیرد. شکل 2 نمای اجزای اصلی مجموعه تولید و انتقال ارتعاشات فراصوت را نشان می‌دهد.

3-1- منبع تغذیه

منبع تغذیه یا ژنراتور، ورودی برق شهر با فرکانس 50Hz را به خروجی متناوب الکتریکی با فرکانس 20-100 کیلوهرتز (در محدوده فرکانس فراصوت توان بالا) تبدیل می‌کند. انواع صنعتی منبع تغذیه در محدوده توان بین 1-5 کیلووات موجود است. هنگام فرایند شکل‌دهی با تغییر نیرو و یا شرایط درگیری ابزار و قطعه‌کار با یکدیگر، فرکانس رزونانس مجموعه مکانیکی کمی تغییر می‌کند به همین دلیل در منابع تغذیه پیشرفته‌تر قابلیت تنظیم خودکار فرکانس (بر مبنای بیشترین جریان خروجی از منبع تغذیه و یا اختلاف فاز صفر بین ولتاژ و جریان خروجی) موجود است.

3-2- ترانسدیوسر فراصوت

ترانسدیوسرها (مبدل‌ها) صورتی از انرژی را به صورت دیگر تبدیل می‌کنند. به طور معمول در عملیات شکل‌دهی به کمک اولتراسونیک می‌توان از دو نوع ترانسدیوسر الکترواستریکتیو (ساندویچی پیزوالکتریک)¹ یا مگنتواستریکتیو (الکترومغناطیسی)² استفاده کرد. ترانسدیوسرهای ساندویچی پیزوالکتریک از آن جهت که انرژی الکتریکی را مستقیماً به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند، نسبت به ترانسدیوسرهای مگنتواستریکتیو (تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مغناطیسی و سپس به ارتعاشات مکانیکی) راندمان بالاتری دارند. به طوری که برای یک عملیات چکش‌کاری اولتراسونیک به جای یک ترانسدیوسر مگنتواستریکتیو 1000 وات می‌توان از یک ترانسدیوسر ساندویچی پیزوالکتریک 250 وات استفاده کرد [6].

ترانسدیوسر فراصوت پیزوالکتریک ساندویچی از تعداد زوج (2-6 عدد) پیزوالکتریک (PZT) تشکیل شده است که توسط یک پیچ مرکزی ما بین دو قطعه فلزی (پشت‌بند و تطبیق) سفت می‌شوند. قطعه پشت‌بند ماده‌ای سنگین (اغلب از جنس St304) و قطعه تطبیق از آلایژ آلومینیوم و تیتانیوم (Al7075-T6 و Ti-6Al-4V) ساخته می‌شوند [8,7]. ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک صنعتی امروزه اغلب دارای محدوده فرکانسی 15-40 کیلوهرتز و دامنه ما بین 8-30 میکرومتر هستند. در ترانسدیوسرهای با فرکانس پایین‌تر می‌توان به دامنه ارتعاش بالاتر و در نتیجه شدت انرژی آکوستیک بالاتری دست یافت.

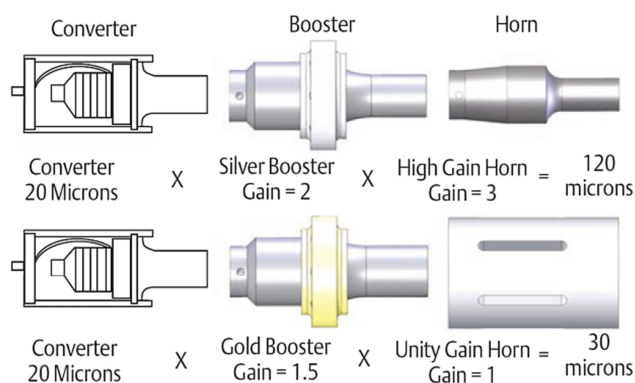


Fig. 2 Power Ultrasonic components: Converter, Booster and Horn [5]

شکل 2 اجزای مجموعه ارتعاشی شامل ترانسدیوسر، بوستر و هورن

همچنین استفاده از ابزارهای با مقاومت حرارتی بالا در شکل‌دهی است که از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود.

یکی از روش‌های مدرن که استفاده از آن به دلیل مزایای چشمگیر آن در مراکز صنعتی رو به گسترش است، شکل‌دهی فلزات به کمک ارتعاشات توان بالای فراصوت است [1]. کاربرد فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی اغلب جهت بالابردن بازده فرایند نظیر افزایش سرعت تولید، کاهش سایش ابزار و یا قالب، کاهش نیروهای شکل‌دهی، بهبود کیفیت سطح و پایداری ابعادی و هندسی قطعه‌کار است [2].

مبحث فراصوت توان بالا شامل تولید، انتقال و تقابل ماده/فرایند است. با توجه به اهمیت این تکنولوژی در صنعت آینده در این مقاله اصول، تجهیزات و تأثیر ارتعاشات فراصوت توان بالا در خصوصیات مواد با تمرکز بر فرایندهای شکل‌دهی مد نظر قرار گرفته است. به دلیل گستردگی تحقیقات در این زمینه دو رویه در مرور مقالات در نظر گرفته شده است. در بخش نخست کاربرد فناوری فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی با تمرکز بر چیدمان آزمون و نتایج تجربی مد نظر قرار گرفته است. در بخش دوم تقسیم‌بندی عوامل و تحلیل تئوری‌های مختلف در زمینه اعمال ارتعاشات فراصوت در مواد و فرایندها ارائه شده است.

2- اصول ارتعاشات فراصوت

امواج اولتراسونیک امواج الاستیک با فرکانس بالاست که قادرند از درون ماده فیزیکی عبور کرده و انرژی را منتقل نمایند. طیف فرکانس امواج اولتراسونیک بالاتر از حد شنوایی انسان (20kHz) است [3]. اجزای اصلی سیستم فراصوت توان بالا (شکل 1) شامل یک ترانسدیوسر فراصوت و منبع تغذیه الکتریکی برای تحریک آن است. میدان آکوستیک خروجی از ترانسدیوسر توسط یک محیط واسط جامد و یا مایع به ماده نهایی تحت عملیات یا ابزار منتقل می‌شود [4]. از نظر محدوده تأثیرگذاری ارتعاشات فراصوت را می‌توان در سه بخش تأثیرات میکروسکوپی و میکروساختاری، تأثیرات ماکروسکوپی و تأثیرات سطحی طبقه‌بندی کرد.

3- تجهیزات اعمال ارتعاشات در فرایندهای شکل‌دهی

ترانسدیوسر فراصوت و منبع تغذیه آن به ترتیب قلب و مغز مجموعه اعمال ارتعاشات فراصوت هستند. وسیله اعمال ارتعاشات فراصوت از ترانسدیوسر به ناحیه شکل‌دهی یا ابزار براساس فرایند می‌تواند شکل‌های متفاوتی داشته باشد و «هورن» نامیده می‌شود. اغلب برای انتقال ارتعاشات و افزایش (یا کاهش) دامنه ارتعاشات و شدت امواج قطعه‌ای به عنوان «بوستر» مابین

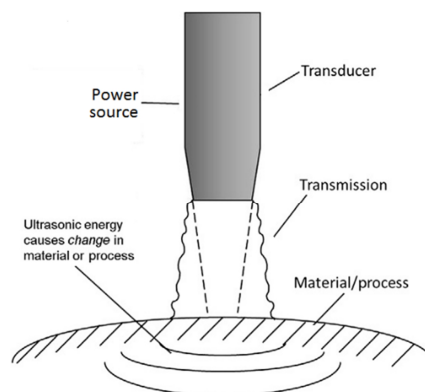


Fig. 1 The power ultrasonic system [4]

شکل 1 مجموعه فراصوت توان بالا

¹ Electrostrictive (Piezoelectric) transducer

² Magnetostrictive (Electromagnetic) transducer

و عبدالله [12] در رأس تیم‌های تحقیقاتی در این زمینه به بررسی پرداخته‌اند و نظریه‌های مختلفی درباره تأثیرگذاری فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی فلزات ارائه کرده‌اند.

نخستین تحقیقات در زمینه اعمال ارتعاشات فراصوت بر خصوصیات فیزیکی مواد به مطالعات بلاها و لانگنر در سال 1955 [13] بر کشش یک تک کریستال روی (Zn) باز می‌گردد. نتایج تحقیقات نشان داد که تنش تسلیم و تنش سیلان با اعمال ارتعاشات فراصوت در کشش تک کریستال روی کاهش می‌یابند. از این‌رو پدیده کاهش تنش تسلیم را «اثر بلاها»⁴ و یا «نرم‌شدگی آکوستیکی»⁵ می‌نامند. آزمون‌های کشش و فشار برای مواد پلی‌کریستال در ادامه تحقیقات پیوسته گسترش یافت و نرم‌شدگی در موادی همچون کادمیم، آهن، تیتانیوم و تنگستن گزارش شد. آن‌ها نرم‌شدگی حاصل از میدان فراصوت را به دلیل ایجاد و حرکت ناهنجاری‌ها بیان کردند.

در ادامه تحقیقات لانگنر [14] نشان داد که ارتعاشات فراصوت و حرارت اثرات مشابهی در کاهش تنش (آزمون فشار و کشش) دارند (شکل 4- a و b). او دریافت برای رسیدن به تنش تسلیم صفر در آلومینیوم انرژی حرارتی لازم معادل 10^{22} eV/cm^3 در مقابل 10^{15} eV/cm^3 برای ارتعاشات فراصوت است. یعنی انرژی فراصوت مورد نیاز برای یک مقدار معین نرمی 10^7 برابر کمتر از انرژی حرارتی مورد نیاز است. او درباره دلیل این امر بیان داشت: «انرژی ارتعاشات فراصوت فقط در نواحی موضعی از شبکه فلزی که مکانیزم تغییر شکل فعال است (مانند جاهای خالی، ناهنجاری‌ها و مرز دانه‌ها) جذب می‌شود، در حالی که توسط گرمادهی، حرارت به صورت یکنواخت در میان اتم‌های کریستال که سهمی در مکانیزم تغییر شکل ندارند توزیع می‌گردد».

4-2- کشش عمیق و اسپینینگ لوله

در فرایند کشش عمیق یک ورق فلزی ما بین قالب و سنبه قرار گرفته و ورق با حرکت پیوسته سنبه کشیده می‌شود و به شکل دلخواه درمی‌آید. برای اعمال ارتعاشات فراصوت در این فرایند می‌توان ارتعاشات را هم به سنبه و هم به قالب اعمال کرد. نیروی اصطکاک بین ورق اولیه و سنبه، قالب و نگهدارنده ورق نقش اساسی را در این فرایند ایفا می‌کند. مزایای حاصل از کاهش نیروی

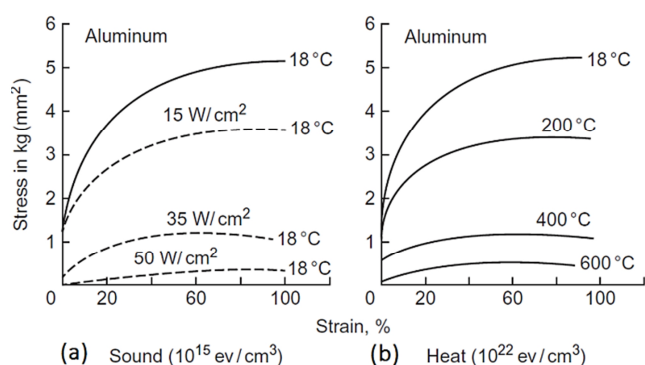


Fig. 4 Stress-strain curves of tensile tests of aluminum single crystals; (a) dashed curves indicate straining during ultrasonic irradiation at 20 kHz, (b) solid curves indicate no irradiation in different temperatures [14]

شکل 4 نمودار تنش- تغییر طول نسبی تک‌کریستال آلومینیوم (خط چین - کرنش هنگام اعمال ارتعاشات فراصوت و خطوط کامل - حالت‌های غیر اعمال ارتعاشات فراصوت)، الف- فرکانس 20kHz و شدت‌های مختلف ب- بدون اعمال ارتعاشات فراصوت در دماهای مختلف

3-3- بوستر و هورن

بوستر و هورن وظیفه انتقال ارتعاشات از ترانسدیوسر به ناحیه تغییر شکل را به عهده دارند و اغلب از جنس آلیاژ آلومینیوم و تیتانیوم و در برخی موارد از جنس فولاد ساخته می‌شوند. اگر مقطع انتقال‌دهنده ارتعاشات با کاهش سطح همراه باشد عمل تمرکز انرژی ارتعاشی انجام خواهد گرفت و دامنه ارتعاشات افزایش خواهد یافت و اگر مقطع دارای افزایش سطح باشد به‌عنوان گسترش‌دهنده ارتعاشات عمل خواهد کرد. در شکل 2 دامنه ارتعاشات در خروجی ترانسدیوسر 20 میکرومتر است. در ردیف بالا بوستر و هورن به ترتیب دارای ضریب بزرگ‌نمایی 2 و 3 و در ردیف پایین به ترتیب برابر 1.5 و 1 است و در نتیجه دامنه ارتعاش انتهای هورن ردیف بالا برابر 120 میکرومتر و در ردیف پایین برابر 30 میکرومتر می‌گردد. انتخاب هر کدام از اجزا براساس کاربرد مورد نظر است. برای نمونه جهت دستیابی به دامنه ارتعاش بالاتر از ردیف بالا و برای دستیابی به قدرت استاتیک بالا (فشردن فلزات) از چیدمان ردیف پایین استفاده می‌شود [5].

4-آزمون‌های تجربی

در این بخش نتایج حاصل از برخی آزمون‌های تجربی در فرایندهای شکل‌دهی نظیر آزمون کشش، آزمون فشار، کشش سیم و لوله، کشش عمیق، چکش‌کاری فراصوت¹ (UIT)، متالورژی پودر و فرایندهای نوین شکل‌دهی نظیر میکروفورمینگ، شکل‌دهی تدریجی² و ECAP³ ارائه می‌شود. به دلیل تعداد بالای تحقیقات در این زمینه شرح نتایج برخی از مقالات برگزیده ارائه و در بخش بحث به نتایج گستره بیشتری از مقالات اشاره خواهد شد. براساس نتایج تحقیقات انجام گرفته، وابسته به نوع فرآیند و نحوه اعمال ارتعاشات فراصوت و خواص مواد تحت آزمون پدیده‌های مختلفی نظیر کاهش اصطکاک، تغییر تنش تسلیم و سیلان ماده، تغییر نیروی لازم برای فرآیند شکل‌دهی و پایداری ابعادی و هندسی محصول نهایی مشاهده شده است. شکل 3 روش‌های اعمال ارتعاشات فراصوت بر فرایندهای شکل‌دهی را نمایش می‌دهد [9].

4-1-آزمون کشش

آزمون کشش یک روش استاندارد برای بررسی رفتار مواد تحت تغییر شکل است. در کاربرد ارتعاشات فراصوت در فناوری‌های شکل‌دهی آزمون کشش مبنای تعیین پارامترهای تأثیرگذاری فراصوت است. به همین دلیل در ادوار مختلف محققان مختلفی از جمله لانگنر [10]، کریستوفی [11]، لوکاس [1]

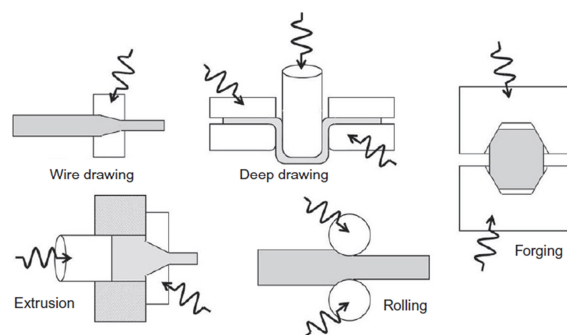


Fig. 3 Ultrasonic applied to metal forming processes [9]

شکل 3 روش‌های اعمال ارتعاشات فراصوت بر فرایندهای شکل‌دهی

¹ Ultrasonic Impact Treatment (UIT)

² Incremental Forming

³ Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)

⁴ Blaha Effect

⁵ Acoustic Softening

4-3- چکش کاری فراصوت (UIT)

پس از عملیات جوش کاری به دلیل ایجاد تنش پسماند کششی در نمونه، ترک‌هایی در قسمت پایه جوش به وجود می‌آید که این ترک‌ها سبب ایجاد تمرکز تنش و کاهش عمر خستگی نمونه می‌شود. اعمال ارتعاشات و ضربات فراصوت در فرایند چکش کاری فراصوت موجب جایگزینی تنش پسماند فشاری به جای تنش پسماند کششی در سطح ماده، حذف یا کاهش تنش‌های پسماند کششی در عمق ماده [21,20]، بسته شدن ترک‌های سطحی و اصلاح شکل پاشنه جوش می‌شود.

ترانسدیوسر با فرکانس بالا (20-40 kHz) در این فرایند ارتعاش کرده و در نتیجه انتهای آزاد ترانسدیوسر نیز با همان فرکانس و دامنه 20-40 μm ارتعاش می‌کند و ارتعاشات را به ضربه‌زننده (پین) انتقال می‌دهد [22]. ضربات پین‌های شناور به پاشنه جوش یا سطح مواد موجب تبدیل تنش کششی به فشاری، بستن ترک‌ها، افزایش استحکام مکانیکی، خستگی و خوردگی ماده و در نتیجه افزایش عمر سازه می‌شود (شکل 6).

جامع‌ترین تحقیقات در زمینه عملیات سطح توسط چکش کاری فراصوت توسط تیمی از دانشمندان روسی به سرپرستی استاتنیکوف برای بهبود خواص خستگی و خوردگی در کاربردهای کشتی‌سازی و ساخت زیردریایی از سال 1980 تا کنون [24,23] در این زمینه در حال انجام است. عملیات چکش کاری فراصوت بر انواع شکل جوش مانند لب به لب، T-شکل و ... و مواد مختلف مانند فولاد ساختمانی، فولاد استحکام بالا و آلومینیوم آلیاژی انجام شد.

آن‌ها بیان داشتند اعمال ارتعاشات فراصوت با اعمال تنش پسماند فشاری و تصحیح شکل پاشنه جوش موجب افزایش استحکام خستگی بین 50-200% برای شکل‌های اتصال و مواد مختلف می‌شود. همچنین اعمال ارتعاشات فراصوت در برخی از مواد با ایجاد تبلور مجدد در سطح نمونه موجب ایجاد لایه سفید و بسیار مقاوم به خوردگی و سایش می‌شود. شکل 7 تأثیر فرایندهای مختلف نظیر جوش کاری دوباره، شات‌پینینگ و چکش کاری فراصوت را در افزایش استحکام خستگی نشان می‌دهد و نشانگر بازده بالاتر فرایند چکش کاری فراصوت نسبت به دیگر فرایندهای مشابه است.

عبداله و همکاران [26,25] اثر چکش کاری فراصوت بر استحکام خستگی، خوردگی و میکروساختار اتصالات جوشی فولاد زنگ زن و آلومینیوم Al6082 را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد با اعمال چکش کاری فراصوت در تنش 300MPa و 330MPa عمر خستگی به ترتیب تا 120% و 70% و مقاومت به خوردگی به مقدار چشمگیری تا 6 برابر نمونه‌های بدون چکش کاری بهبود

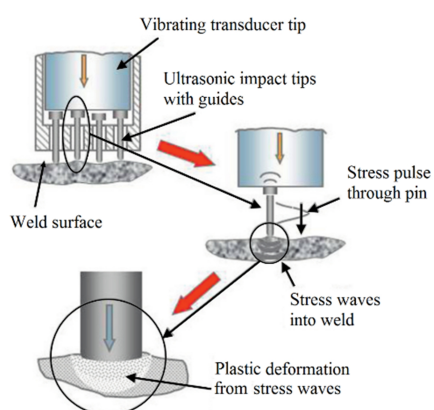


Fig. 6 stress pulse transmission in ultrasonic peening [9]

شکل 6 اعمال ضربات توسط ابزار به قطعه کار در فرایند چکش کاری فراصوت

اصطکاک به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت مبنای بسیاری از تحقیقات در این زمینه قرار گرفته است [15].

کریستوفی [16,11] اثر ارتعاشات فراصوت را در فرایند کشش عمیق با اعمال ارتعاشات به سنبه (محوری) و قالب (شعاعی) به طور مجزا و ترکیبی بررسی کرد. شکل 5 تأثیر ارتعاشات سنبه را در کاهش نیروهای شکل‌دهی کشش عمیق نشان می‌دهد.

جیما و همکارانش [17] اثر ارتعاشات محوری و شعاعی اولتراسونیک را بر نسبت کشش حدی¹ (LDR) در فرایند کشش عمیق متقارن محوری بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به سنبه، ورق گیر و یا قالب سبب کاهش اصطکاک و مقاومت تغییر شکل ماده شده و در نتیجه LDR را افزایش می‌دهد. برای ورق کارسرد شده مقدار LDR از 2.58 (روش معمول) به 2.86 (اعمال ارتعاش تنها به ورق گیر) و 2.94 (اعمال همزمان ارتعاش به ورق گیر و قالب) افزایش یافت.

عبداله و سهرابی‌فر [18] فرایند کشش عمیق ورق فولادی St12 به ضخامت 0.5 میلی‌متر و اثر ارتعاشات فراصوت بر نیروهای شکل‌دهی و نسبت حد کشش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند با اعمال ارتعاشات فراصوت نیروی شکل‌دهی 11.3% کاهش یافته و نسبت حد کشش از 2.2 به 2.3 افزایش یافته است که در حدود 5% افزایش را نشان می‌دهد.

عبداله و رسولی [19] اثر اعمال ارتعاشات طولی فراصوت را بر نیروهای شعاعی، محوری و مماسی بر غلتک و کیفیت سطح داخلی قطعات در اسپینینگ لوله از جنس AA-6061 مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند در توان‌های بالای فراصوت کاهش نیرو تنها در جهت شعاعی (4-13%) اتفاق افتاده و در جهات دیگر تغییر مشاهده نمی‌شود، همچنین با اعمال ارتعاش فراصوت سختی سطح خارجی نمونه افزایش یافت، اما تغییری در سطح داخلی مشاهده نشد. به علاوه با افزایش نرخ پیشروی و ضخامت نمونه اثر فراصوت کاهش یافت.

تفسیر آن‌ها از نتایج مشاهده شده آن بود که تغییرات نیروهای فرم‌دهی کمتر از اثرهای حجمی (جذب انرژی توسط میکروساختار) تأثیر می‌پذیرد و بیشتر متأثر از تغییر شرایط اصطکاکی بین قطعه و ابزار است. در نهایت آن‌ها بیان داشتند تغییر شرایط شکل‌دهی به واسطه عوامل متعددی نظیر حضور یا عدم حضور ارتعاشات فراصوت، برآمدگی ماده هنگام شکل‌دهی و تاریخچه شکل‌دهی ماده است که هر یک می‌تواند به تنهایی اثر قابل توجهی بر نتیجه آزمون داشته باشد.

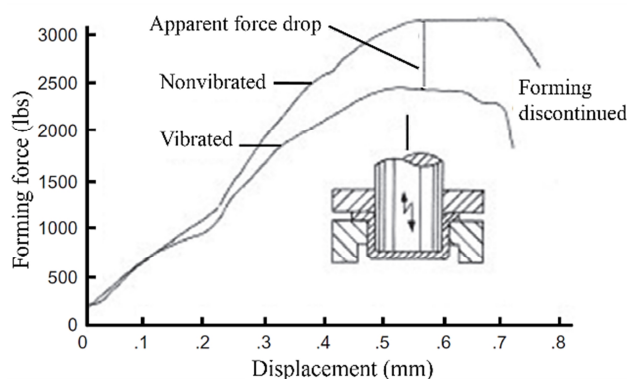


Fig. 5 influence of ultrasonics on the forming force in deep drawing process [11]

شکل 5 تأثیر ارتعاشات فراصوت بر نیروی تغییر شکل در فرایند کشش عمیق

¹ Limiting Drawing Ratio (LDR)

از نظر علمی و تکنولوژیکی نیز بسیار مفید بوده و می‌تواند منجر به کاهش نیروی لازم برای شکل‌دهی لوله و کاهش تعداد مراحل کشش و باز کشش در طول فرآیند تولید شود.

لهفلت [28] آزمون کشش سیم فولادی تحت ارتعاشات فراصوت را مورد بررسی قرار داد. شکل a-9 چیدمان قالب کشش سیم و اعمال ارتعاشات فراصوت و شکل b-9 کاهش نیروی کشش سیم را با قطع و وصل ارتعاشات فراصوت نشان می‌دهد.

مورااکاوا و جین [30,29] اثر اعمال ارتعاشات طولی و شعاعی به قالب را در کشش سیم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند در حالت اعمال ارتعاشات شعاعی به قالب نتایج مطلوبی از کاهش نیرو و بهبود کیفیت سطح حاصل می‌شود، همچنین در ارتعاش شعاعی می‌توان دامنه وسیع‌تری از سرعت‌های کشش را مورد استفاده قرار داد.

عبداله و همکارانش [31] بررسی تئوری و تجربی فرآیند فرم‌دهی نفوذی لوله به کمک ارتعاشات طولی فراصوت را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند اعمال ارتعاشات فراصوت موجب کاهش نیروهای شکل‌دهی (15-25 درصد) و بهبود کیفیت سطح می‌شود. به این منظور آن‌ها چیدمانی با استفاده از ترانسیدوسر ساندوپیچی توان بالای 3kW طراحی کرده و مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها دریافتند با افزایش دامنه ارتعاشی نیروی لازم برای فرم‌دهی نفوذی کاهش می‌یابد.

5-4- آهن‌گری و آزمون فشار (آپستینگ)

در عملیات آهن‌گری حجم مشخصی از ماده در حالت‌های سرد و داغ با نرخ کرنش معین در قالب بسته یا باز فشرده شده و رفتار تغییر شکل ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. حالت ساده‌تر آزمون آهن‌گری برای ارزیابی خصوصیات

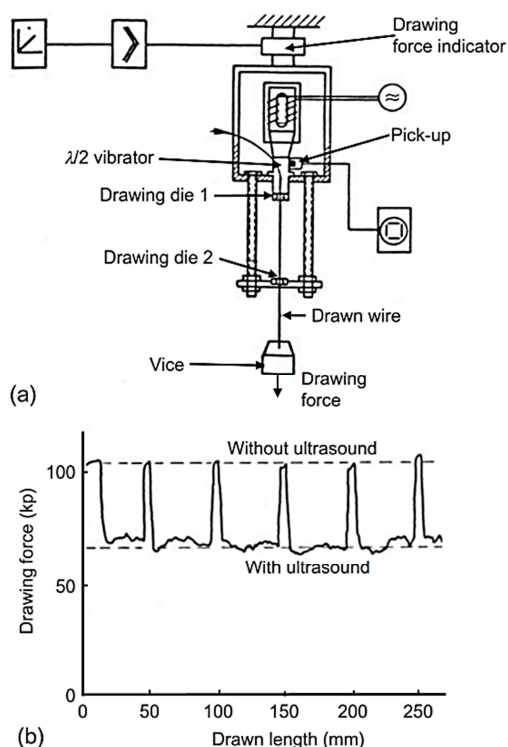


Fig. 9 Wire drawing work. a- Experimental wire drawing setup and b- draw force on copper wire with on-off ultrasound [28]

شکل 9 آزمون کشش سیم به کمک ارتعاشات فراصوت الف- نمای چیدمان کشش و ب- کاهش نیرو در کشش سیم مس با قطع و وصل ارتعاشات فراصوت.

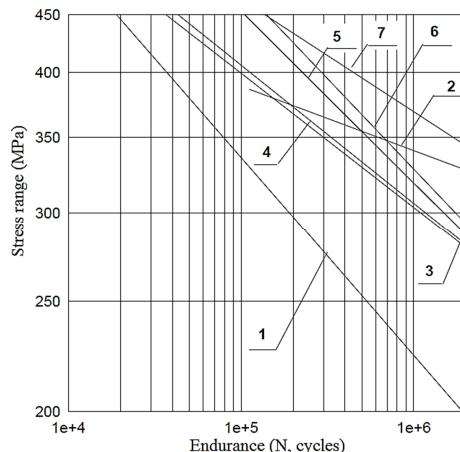


Fig. 7 Fatigue curves for welded joint in steel Weldox 420 in the as-welded and improved conditions: 1- as welded, 2- UIT treated using indenters of diameter 5 mm, 3- hammer peened, 4- shot peened, 5- TIG dressed, 6- TIG dressed and UIT treated using indenters of diameter 5 mm, 7- UIT treated using indenters of diameter 3 mm [24]

شکل 7 مقایسه روش‌های مختلف بهبود استحکام خستگی جوش 1- جوش کاری شده، 2- پس از UIT با پین به قطر 5 میلی‌متر، 3- پس از چکش کاری مکانیکی، 4- پس از شات‌پینینگ، 5- پس از TIG Dressing، 6- پس از TIG Dressing و UIT با پین به قطر 5 میلی‌متر و 7- پس از UIT با پین به قطر 3 میلی‌متر

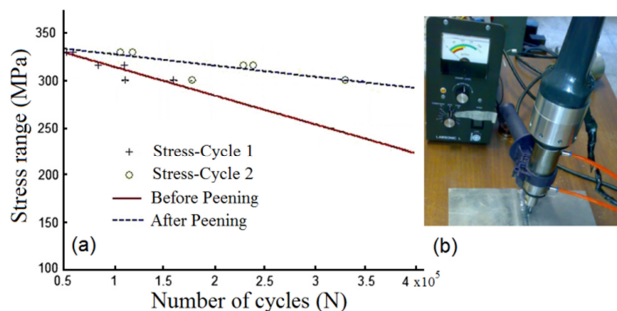


Fig. 8 a- S-N curves of specimens with and without ultrasonic peening and b- Ultrasonic peening tool [25]

شکل 8 الف- نمودار تنش-تعداد سیکل نمونه‌های تحت آزمون خستگی با و بدون اعمال چکش کاری فراصوت و ب- ابزار چکش کاری فراصوت

یافته است. همچنین اعمال چکش کاری فراصوت موجب افزایش سختی سطح در نمونه‌ها تا عمق 200μm پس از عملیات جوش کاری شده است.

4-4- کشش سیم و لوله

کشش سیم و لوله به فرایند کاهش سطح مقطع سیم و لوله با اعمال فشار به آن درون یک قالب گفته می‌شود. اعمال ارتعاشات فراصوت به فرایند کشش سیم و لوله موجب افزایش سرعت کشش، بهبود کیفیت سطح، کاهش نیروهای کشش سیم و لوله، افزایش میزان کاهش سطح مقطع به ازای هر مرحله و افزایش عمر ابزار می‌شود. این مزایا برای مواد گوناگون، چیدمان مختلف آزمون‌ها و سرعت‌های کشش مختلف، متفاوت است.

آتانازیو [27] اثر ارتعاشات اولتراسونیک را بر فرآیند کشش سیم و لوله بررسی کرد. او تأثیر این ارتعاشات را به دو دسته اثر حجمی و اثر سطحی تقسیم‌بندی کرد که اثر حجمی شامل کاهش تنش لازم برای شکل‌دهی فلز و افزایش کرنش شکست و اثر سطحی شامل کاهش اصطکاک بین سطوح در تماس است. او نشان داد که استفاده از امواج سبب کاهش تنش تسلیم ماده و ضریب اصطکاک در فرآیند کشش لوله می‌شود، همچنین استفاده از این امواج

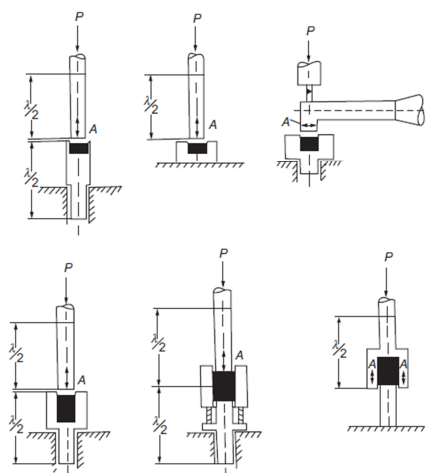


Fig. 10 Different ways in which the pressing tool may be excited into ultrasonic vibration [36]

شکل 10 روش‌های مختلف اعمال ارتعاشات فراصوت بر ابزار فشردن پودر

را بر پودرهای فلزی آهن و نیکل مورد بررسی تجربی و تئوری قرار دادند. روش انجام آزمون‌ها بدین صورت بود که پس از حرارت‌دهی و هم‌دمای شدن نمونه‌ها (دماهای 700، 800 و 900 درجه سانتی‌گراد) اعمال ارتعاشات فراصوت در دو حالت 1- فشردن استاتیکی و ارتعاشی فراصوت هم‌زمان 2- ابتدا فشردن استاتیکی و سپس اعمال ارتعاش فراصوت در مرحله خزش حالت پایدار با تنش استاتیک 10.2 MN/m^2 انجام گرفت. در این تحقیق پودر در ناحیه شکم ارتعاشی قالب قرار گرفت و انقباض خطی نسبی هنگام فرآیند تفجوشی از نسبت تغییر در طول نمونه نسبت به طول اولیه اندازه‌گیری شد. آن‌ها بیان داشتند اعمال ارتعاش فراصوت در ابتدای فشردن‌سازی به فرآیند گذرا چگالش شتاب می‌دهد، اما اثر قابل توجهی بر مشخصه‌های خزش حالت پایدار ندارد (شکل 11-a).

کرومپ و همکارانش [40,39] به بررسی اثر اعمال ارتعاشات (استاتیک، فرکانس پایین 150Hz و فراصوت 22kHz) در فشردن داغ پودر کروم مس پرداختند. آن‌ها مشارکت سه مکانیزم خزش توانی، نفوذ و تغییر چیدمان ذرات را در نرخ چگالش کل هنگام فشردن هم‌دمای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند با اعمال ارتعاشات فراصوت می‌توان به چگالی بالاتر، توزیع چگالی بهتر و دستیابی به ساختاری مستحکم‌تر دست یافت.

تسوجینو و همکارانش [42,41] در تحقیق خود به فشردن‌سازی پودر فلزها، آلیاژها و سرامیک‌های گوناگون در دمای محیط با مرتعش کردن سنبه‌های بالا و پایین و بدنه قالب پرداختند. آن‌ها مطالعه خود را روی دو سیستم متفاوت فشردن‌سازی اولتراسونیک انجام دادند: اعمال ارتعاشات به سنبه (طولی) و قالب (شعاعی) و همچنین به طور هم‌زمان. نتایج آن‌ها نشان داد اعمال ارتعاشات به سنبه تأثیر بیشتری در افزایش چگالی دارد. با اعمال ارتعاشات به طور هم‌زمان به سنبه و قالب می‌توان به بهترین نتیجه دست یافت (شکل 11-b).

7-4- فرایندهای نوین شکل‌دهی (میکروفورمینگ، شکل‌دهی تدریجی و ECAP)

با پیشرفت فرایندهای شکل‌دهی و ظهور فرایندهای نوین مانند میکروفورمینگ، شکل‌دهی تدریجی و ECAP برخی محققان به تحقیق در زمینه اعمال ارتعاشات فراصوت در این فرایندها پرداخته‌اند. در ادامه به نتایج برخی از این تحقیقات اشاره خواهد شد.

استحکام ماده آزمون فشار که در آن نمونه یک استوانه ساده با ابعاد استاندارد است. نتایج حاصل از اعمال ارتعاشات فراصوت در آهن‌گری مواد نشانگر کاهش تنش سیلان، کاهش ضریب اصطکاک بین سنبه، قالب و قطعه و کاهش برگشت فنی است. در این ارتباط در ادامه به نتایج برخی تحقیقات اشاره خواهد شد.

هانگ و همکارانش [33,32] در تحقیقات خود به بررسی اثر اعمال ارتعاشات فراصوت (فرکانس 20kHz و دامنه $5 \mu\text{m}$) در آهن‌گری داغ آلومینیوم پرداختند. نتایج آزمون‌ها نشان داد که اعمال ارتعاشات فراصوت در آزمون فشار هنگامی که اصطکاک کم است (در دمای محیط) سبب کاهش مؤثر تنش سیلان و نیروی فشاری شده و می‌تواند دمای ماده را افزایش دهد. به طور کلی اعمال ارتعاش فراصوت موجب افزایش دمای ماده، کاهش تنش سیلان و همچنین افزایش اصطکاک بین سطوح (به دلیل افزایش دما) می‌شود.

همچنین مشاهده شد با افزایش دما بازده ارتعاشات فراصوت کاهش می‌یابد و دلایل آن را: الف- حاکم شدن خصوصیات خزش مواد با افزایش دما در نتیجه تغییر مکانیزم تغییر شکل نسبت به حالت در دمای اتاق و کاهش انرژی جذب شده از فراصوت و کاهش اثرگذاری فراصوت، ب- افزایش دمای بین قالب و قطعه و کاهش اثر کاهنده ضریب اصطکاک فراصوت بیان کردند. داود و همکارانش [35,34] اثر ارتعاشات فراصوت را بر نمونه‌های آلومینیومی در آزمون کشش و فشار به صورت آزمون‌های تجربی و اجزاء محدود تحلیل و بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده کاهش 30 درصد تنش سیلان در نمونه‌های آلومینیوم در مقایسه با حالت عادی بود. آن‌ها عنوان کردند کاهش اصطکاک برهم نهد تنش‌های استاتیک و ارتعاشی (فراصوت) و جذب ارتعاشات در ناهمبایی‌ها از عوامل کاهش تنش سیلان است. این عوامل به تنهایی پاسخ‌گوی اثرات ارتعاشات فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی نیستند. همچنین نرم‌شدگی به دلیل تغییرات کم دما نمی‌تواند دلیل افزایش ناچیز دما باشد و لازم است نحوه جذب ارتعاشات فراصوت توسط میکروساختار ماده شناخته شود تا بتوان پدیده‌های هنگام اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی را شرح داد.

4-6- متالورژی پودر (فشردن پودر)

اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند متالورژی پودر، (فشردن سرد و داغ) کاهش نیروهای استاتیک و کاهش دما و زمان مورد نیاز برای فرایند فشردن را امکان‌پذیر می‌سازد. اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند فشردن پودر موجب حرکت حجمی ذرات می‌شود که افزایش چگالش، یکنواختی ساختار و استحکام قطعه فشرده شده را در پی دارد.

لیفلت [36] در تحقیق خود به بررسی اثر ارتعاش فراصوت در فشردن سرد، فشردن داغ و اکستروژن پودر آهن پرداخت. او ارتعاشات را توسط ترانسدیوسر فراصوت مگنتوستریکتیو¹ با فرکانس 20kHz و حداکثر توان ارتعاشی فراصوت 400W ایجاد کرد. او بیان داشت اعمال ارتعاشات فراصوت قادر می‌سازد تا دمای کوره به اندازه‌ی 50°C کاهش یابد و این موضوع می‌تواند مزیت بزرگی در جلوگیری از تغییر فاز به حساب آید. چیدمان‌های مختلف اعمال ارتعاشات فراصوت در تحقیقات لیفلت در شکل 10 نشان داده شده است.

پوکریشو و همکارانش فشردن داغ تحت خلاء و اعمال ارتعاشات فراصوت

¹ Magnetostrictive

(قالب) و قطعه‌کار است.

هدف از این بخش بررسی اثرات و مکانیزم‌های به وجود آورنده آن هنگام اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی است. در ادامه علاوه بر موارد پیشتر یادشده، نشانه‌های حاصل از آزمون‌ها، فرضیه‌ها و عوامل مختلف ارائه شده توسط محققین با ارائه مراجع مرتبط شرح بیشتری داده می‌شوند.

5-1-1- کاهش اصطکاک خارجی

تحقیقات در بررسی اثر اعمال ارتعاشات فراصوت بر اصطکاک خارجی براساس دو رویه انجام شده است. در رویه نخست تأثیر فراصوت بر ضریب و نیروی اصطکاک هنگام فرایندهای شکل‌دهی مختلف نظیر کشش عمیق، کشش سیم و آزمون فشار مورد بررسی قرار گرفته است [34]. در رویه دوم چیدمان‌هایی برای اندازه‌گیری اصطکاک بین سطوح طراحی شد و با اعمال ارتعاشات مقدار تغییرات اصطکاک حاصل با مقادیر کمی بیان شده است [51-49].

با اعمال ارتعاشات فراصوت به ابزار یا قالب (در اغلب موارد) وابسته به جهت اعمال ارتعاشات فراصوت و سرعت و جهت حرکت ماده ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. به دلیل کاهش ضریب و نیروی اصطکاک به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت در بسیاری از مراجع این پدیده با عنوان «روان‌کاری فراصوت» شناخته شده است [50]. البته این مستقل از مواردی است که به دلیل افزایش دما، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد [33]. عوامل مختلفی برای کاهش نیروی اصطکاک بیان شده است که از جمله می‌توان به تغییر جهت لحظه‌ای برآیند نیروی اصطکاک در سطوح تماس و تغییر ضریب اصطکاک ایستایی اشاره کرد.

در بین مقالات ارائه شده در این زمینه بیشترین ارجاع به تحقیقات پلمن و لهفلت [49] داده شده است. آن‌ها توسط یک چیدمان تماس ابزار و قطعه کار را در حالت‌های مختلف سرعت و جهت تماس با و بدون حضور ارتعاشات فراصوت بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد کاربرد فراصوت تحت شرایط مناسب می‌تواند به طور قابل توجهی نیروهای اصطکاکی خارجی لازم برای تغییر شکل پلاستیک نمونه‌های فلزی را کاهش دهد، ولی با افزایش سرعت حرکت نسبی اثر کاهش ضریب اصطکاک فراصوت از بین می‌رود. آن‌ها بیان کردند «اثر ارتعاشات فراصوت در فرایندهای اصطکاکی تنها در حالتی قابل ملاحظه است که سرعت نسبی تماس ابزار و قطعه در مقایسه با سرعت ذرات $v = 2\pi fA$ کوچک باقی بماند» و بر همین اساس مفهوم «سرعت بحرانی» را ارائه کردند.

5-1-2- کاهش نیروهای شکل‌دهی و تنش سیلان

در اغلب آزمون‌های شکل‌دهی کاهش تنش تسلیم و سیلان ماده مشاهده شده است. بررسی این پارامتر به دلیل وابستگی مستقیم نیروهای شکل‌دهی به آن در اغلب تحقیقات مشاهده می‌شود. میزان کاهش تنش سیلان به پارامترهای مختلفی مانند مقدار نیروهای استاتیکی شکل‌دهی، توان و دامنه ارتعاشات، جنس مواد و پیشینه شکل‌دهی وابسته است.

برخی مانند کریستوفی این کاهش در نیروهای فرایند را وابسته به برهم نهی تنش‌ها دانسته‌اند [11] و برخی دیگر مانند لانگنر این میزان کاهش نیرو را وابسته به کاهش تنش سیلان و فراتر از مسأله برهم نهی و وابسته به مکانیزم‌های افزایش دمای موضعی و ایجاد حرارت در ناهنجایی‌ها (نرم‌شدگی آکوستیکی) دانسته‌اند. آن‌ها بیان می‌دارند در نرم‌شدگی فراصوت، ناهنجایی‌های قفل‌شده در اثر تغییر شکل‌های معمولی توسط ارتعاشات

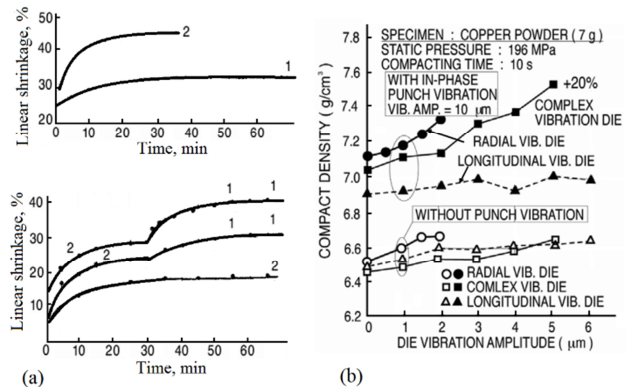


Fig. 11 (a) Linear shrinkage in hot pressing of iron powder under pressure of 130 kgf/cm² (1) with and (2) without ultrasonic in different temperatures and (b) relationships between vibration amplitude of various 27 kHz dies and 20 kHz upper and lower vibration punches, and compact density of copper compacts

شکل 11 الف- انقباض خطی در فشردن داغ پودر آهن تحت فشار 130 kgf/cm² - 1 با و 2- بدون حضور فراصوت در دماهای مختلف، ب- رابطه بین دامنه ارتعاش قالب (27 kHz) و ارتعاش سنبه‌های بالا و پایین (20 kHz) و چگالی نمونه فشردن سرد مس

فرایند میکروفرمینگ شامل تمامی فرایندهای اشاره شده پیشین است با این تفاوت که در ابعاد میلی‌متر و زیر میلی‌متر انجام می‌گیرد. یانو سرگروه تحقیقاتی دانشگاه آیووا [44,43] ارتعاشات فراصوت را بر برخی از فرایندهای شکل‌دهی در ابعاد میلی‌متری (میکروفرمینگ) اعمال کرد. در تحقیقات او از گونه‌ای جدید از ترانسیدوسرهای مگنتواستریکتیو بر پایه ماده ترفنول-D برای اعمال ارتعاشات به سنبه و قالب بهره برده شد. در اغلب تحقیقات در این زمینه کاهش نیروهای شکل‌دهی مشاهده و عامل اصلی آن نرم‌شدگی آکوستیکی بیان شد. او چیدمانی طراحی کرد تا هنگام اعمال ارتعاشات فراصوت بتواند نیروهای لحظه‌ای را اندازه‌گیری کند.

وحدتی و همکاران [46,45] اثر ارتعاشات فراصوت را بر توسعه فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با تحقیق درباره اثر آن بر مؤلفه عمودی نیروهای شکل‌دهی و پدیده برگشت فنری مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که انتقال و اعمال فراصوت موجب کاهش میانگین نیروهای شکل‌دهی (طی حرکات عمودی و افقی ابزار مرتعش به ترتیب به میزان 23.5% و 26.3%) و کاهش میزان برگشت فنری نمونه شکل‌دهی می‌شود.

احمدی و همکاران [48,47] اثر اعمال فراصوت را در فرایند ECAP مورد بررسی اجزاء محدود و تجربی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند اعمال ارتعاشات فراصوت در دامنه‌های 2.5 و 5 میکرومتر موجب کاهش اندازه دانه‌های نمونه حاصل از 45 به ترتیب 28.2 و 22 میکرومتر می‌شود، همچنین اعمال فراصوت موجب دستیابی به نمونه‌های همگن‌تر و با استحکام تسلیم و نهایی بالاتر نسبت به نمونه‌های معمول می‌گردد.

5- بحث

5-1- اثر اعمال ارتعاشات

ارتعاش اولتراسونیک روی خواص مکانیکی و میکروساختاری مواد تأثیرگذار است. تمام محققین این حقیقت را پذیرفته و همه آن‌ها معتقدند که اثر ارتعاش اولتراسونیک روی مواد را می‌توان به دو دسته اثر حجمی و اثر سطحی تقسیم کرد. مهم‌ترین موضوعاتی که در مورد اثر حجمی فراصوت بر خواص تغییر شکل پلاستیک مواد توجه محققان را به خود جلب کرده است، نرم‌شدگی (هنگام اعمال ارتعاشات) و سخت‌شدگی (پس از برداشتن ارتعاشات) است. اثر سطحی شامل تغییر شرایط اصطکاکی خارجی بین ابزار

تئوری «برهم نهی تنش‌ها» می‌گوید با اعمال ارتعاشات فراصوت هنگام شکل‌دهی، تنش‌های فراصوت به تنش‌های استاتیک اضافه می‌شوند و برهم نهی این دو اتفاق می‌افتد. این فرضیه تأکید می‌کند که رفتار پلاستیک ماده به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت تغییر نمی‌کند بلکه تسلیم و سیلان ماده تنها به دلیل جمع آثار تنش‌های استاتیک و فراصوت به‌وجود می‌آید. برخی از محققان مانند کریستوفی، نویل و پروتزن، پولمن و لیفلت، سانسومه (سرگروه تحقیقاتی دانشگاه آستون بیرمنگهام) بر این فرضیه تأکید دارند. شکل 12 رابطه خطی بین کاهش نیروهای شکل‌دهی و مقدار نیروی استاتیک در عملیات آهن‌گری سرد فراصوت را در تحقیقات کریستوفی بر آلیاژ آلومینیوم AA1100 نشان می‌دهد [11].

5-2-2- ایجاد و جابه‌جایی ناهنجاری‌ها

در فرضیه «ایجاد و جابه‌جایی ناهنجاری‌ها» می‌توان بیان داشت ناهنجاری‌هایی که هنگام تغییر شکل به موانع برخورد می‌کنند می‌توانند توسط میدان فراصوت فعال گردند، که این به‌عنوان پدیده کاهش تنش تسلیم یا نرم‌شدگی آکوستیکی شناخته می‌شود. قابلیت تحرک ناهنجاری‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر میدان فراصوت افزایش می‌یابد و مقاومت کمتری از طرف موانع مشاهده می‌شود. تحقیقات آبرامو [2] و پوسکار [57] نشان می‌دهد که اعمال ارتعاش فراصوت موجب افزایش چگالی ناهنجاری‌ها و تمرکز عیب‌های نقطه‌ای می‌شود. براساس این فرضیه اعمال میدان آکوستیک فراصوت موجب افزایش چگالی ناهنجاری‌ها از طریق کاهش تنش برشی در سیستم لغزش و نیز تسهیل در حرکت ناهنجاری‌ها می‌شود.

5-2-3- افزایش دمای موضعی و کل ماده

فرضیه افزایش دمای موضعی بیان می‌دارد با اعمال ارتعاشات فراصوت، انرژی آکوستیک توسط عیوب در ساختار کریستالی فلزات جذب شده و آثار حرارت ناشی از اتلاف انرژی در ماده موجب افزایش دمای موضعی در موقعیت‌های میکروسکوپی مانند مرزدانه‌ها، عیب‌های کریستالی و ناهنجاری‌ها می‌شوند [58,57]. در نتیجه این مسأله تسهیل حرکت ناهنجاری‌ها از موانع هنگام تغییر شکل و کاهش تنش سیلان ماده را در پی دارد.

5-3- پارامترهای فرایند شکل‌دهی به کمک ارتعاشات فراصوت

پارامترهایی که در فرایند شکل‌دهی تأثیرگذارند عبارتند از فرکانس فراصوت، دامنه ارتعاش، نیروی استاتیک شکل‌دهی، توان، انرژی و زمان اعمال ارتعاشات، خصوصیات ماده تحت عملیات، هندسه قطعه کار و مشخصه‌های

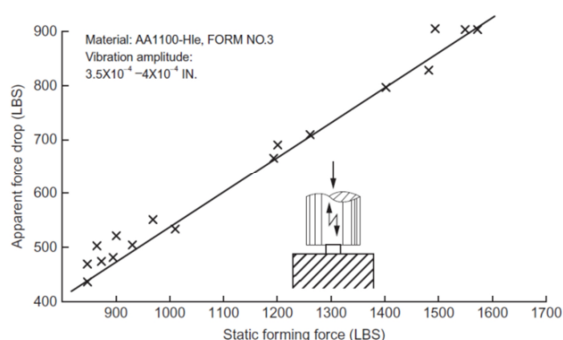


Fig. 12 Linear relation between apparent forming force drop and static forming force in ultrasonic cold forging [11]

شکل 12 رابطه خطی بین کاهش نیروهای شکل‌دهی و مقدار نیروی استاتیک در عملیات آهن‌گری سرد فراصوت

فراصوت فعال شده و سبب کاهش تنش در تغییر شکل‌های پلاستیک بیشتر می‌شود.

5-1-3- سخت‌شدگی و نرم‌شدگی پس از اعمال فراصوت (پسماند)

در حالت سخت‌شدگی فراصوتی در اثر اعمال انرژی فراصوت، ساختار کریستالی ماده دچار دگرگونی شده و با افزایش و توسعه این دگرگونی‌ها، استحکام تسلیم آن افزایش یافته و سخت‌شدگی فراصوت رخ می‌دهد. برخی از محققان از جمله لانگنر پدیده سخت‌شدگی پس از برداشتن ارتعاشات فراصوت را گزارش کردند. این پدیده اغلب در مواردی که توان و شدت بالای فراصوت به ماده اعمال شود و یا به بیان دیگر مقدار تنش ارتعاشی از یک مقدار آستانه تجاوز کند دیده می‌شود [52].

نرم‌شدگی پسماند در تحقیقات هوانگ بر شکل‌پذیری مس و نقره تحت ارتعاشات فراصوت مشاهده شد (13% برای مس و 8% برای نقره). آن‌ها این نرمی پسماند را به تعادل بین آنیل و بازیابی دینامیک و ایجاد و حرکت ناهنجاری‌ها نسبت دادند [53].

5-1-4- تغییر مدول الاستیک ماده

اگرچه بیشتر محققان به کاهش تنش سیلان ماده اذعان کرده‌اند، اما تنها نتایج تعداد محدودی از تحقیقات نشانگر کاهش مدول الاستیک و یا تغییر رفتار ماده در ناحیه الاستیک بوده‌اند [10] و بسیاری از محققان بر عدم تأثیرگذاری ارتعاشات فراصوت در ناحیه الاستیک صحت گذاشته‌اند [54,49]. در نتیجه شواهد در این زمینه ضد و نقیض است.

5-1-5- افزایش دمای قابل ملاحظه

با اعمال ارتعاشات فراصوت در اغلب موارد افزایش دمای محدود ملاحظه می‌گردد. در برخی موارد با اعمال ارتعاشات فراصوت در شدت و توان بالا، با گذشت 20-30 ثانیه دما تا 200°C افزایش یافته است. ایجاد حرارت موضعی در نواحی ناپیوستگی نظیر ترک‌های خستگی، عیب‌های ایجاد شده در ساختار ماده و مرز دانه‌ها مهم‌ترین عوامل افزایش دما به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت معرفی شده‌اند [56,55].

5-2- عوامل تئوریک

به منظور بررسی اثر اعمال ارتعاشات فراصوت در فرآیندهای شکل‌دهی لازم است در کنار مشاهدات و پدیده‌های میکروسکوپی، به بررسی مکانیزم‌ها و پدیده‌هایی که به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت در رفتار مواد به وجود می‌آید نیز پرداخته شود. اغلب پدیده‌ها و مکانیزم‌های بیان شده در قالب فرضیه‌هایی است که از مشاهدات میکروسکوپی برگرفته شده‌اند. دلیل این امر عدم امکان‌پذیری بررسی میکروسکوپی و میکروساختاری ماده هنگام تغییر شکل به کمک ارتعاشات فراصوت است.

براساس مطالعات آبرامو [2] شکل‌دهی فراصوت فلزات به تأثیرات فیزیکی ارتعاش بر حجم و سطح فلز تحت عملیات وابسته است. دامنه این اثرات گسترده و شامل جذب انرژی، ایجاد ناهنجاری‌ها و تغییر شکل پلاستیک، نفوذ، ایجاد حرارت، تبدیل فاز، خستگی و تغییر در اصطکاک سطح است. در این بین برخی تأثیر ارتعاشات بر رفتار پلاستیک ماده را ناچیز انگاشته و تنها برهم نهی تنش‌های استاتیک حاصل از شکل‌دهی و فراصوت در کاهش نیروهای استاتیک تغییر شکل تأکید دارند.

5-2-1- برهم نهی تنش‌ها

ارتعاشات به ابزار چرخشی است. در مجموعه‌هایی که ابزار دارای حرکت چرخشی است. اعمال ارتعاشات به ابزار به مراتب سخت‌تر و باید از مجموعه‌های انتقال قدرت برق چرخان مانند اسلیپرینگ استفاده کرد و تمهیدات لازم را برای به کمینه رساندن انتقال ارتعاشات به یاتاقان مورد نظر قرار داد.

در فرایندهای صنعتی نصب و برداشتن سیستم ارتعاشی از روی قطعه زمان‌بر است. در نتیجه به دلیل نیاز به نرخ بالای تولید و صرفه‌جویی در زمان انجام فرایند بهتر است ارتعاشات به ابزار یا قالب اعمال شود (مانند اعمال ارتعاشات به سنبه در جوش کاری فراصوت پلاستیک‌ها). در اغلب فرایندها مانند کشش عمیق و فشردن پودر اعمال ارتعاشات به صورت ترکیبی و به طور هم‌زمان به ابزار و قالب نتایج مطلوب‌تری در کاهش نیروها خواهد داشت.

6- آینده تحقیقات فراصوت

اغلب نتایج ارائه‌شده در این مقاله و تحقیقات مشابه در طبقه‌بندی تحقیقات علمی دانشگاهی قرار می‌گیرند و تنها تعداد محدودی از تحقیقات در زمینه اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی در ابعاد کاربردهای صنعتی گسترش یافته‌اند. استفاده از این فناوری امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند جوش کاری پلاستیک‌ها و فلزات، عملیات روی مایعات، شستشوی فراصوت و ... روبه گسترش است. باید توجه داشت تنها راه بهره‌گیری از نتایج تحقیقات در یک فناوری، صنعتی‌سازی آن است. بدین منظور با هدف صنعتی‌سازی اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای مختلف شکل‌دهی در آینده نزدیک نیازمندی‌ها و نکات زیر باید مورد نظر قرار گیرند:

1- افزایش توان فراصوت: بسیاری از فرایندهایی که ارتعاشات فراصوت به آن‌ها اعمال شده در ابعاد نیروهای کوچک است. با توجه به نتایج خوب فراصوت در این ابعاد لازم است این فناوری برای استفاده در کاربردهای صنعتی بزرگ‌نمایی شود. بدین منظور باید بتوان ترانس‌دیوسرها و منابع تغذیه با توان بالاتر (تا حدود 10kW) با قابلیت تنظیم دقیق فرکانس تحریک و دیگر پارامترهای کنترلی توان و دامنه ارتعاش طراحی و ساخت را به کار برد. در این زمینه مسأله خنک‌کاری ترانس‌دیوسر (پیزوها و الکترودها) با توجه به مصرف و اتلاف انرژی زیاد در آن‌ها در توان‌های بالا از اهمیت بسزایی برخوردار است. بدین منظور می‌توان از فن‌های خنک‌کاری و جک‌های آب در نواحی نزدیک به پیزوها و الکترودها بهره برد.

2- فناوری مولدهای قدرت خود تنظیم فرکانس: هنگام فرایندهای شکل‌دهی، نیروها و شرایط مرزی بین ابزار و قطعه‌کار تغییر می‌کند و به واسطه جذب انرژی ارتعاشی در ناحیه شکل‌دهی و یا اتلاف انرژی در ترانس‌دیوسر و مجموعه ارتعاشی افزایش دما مشاهده می‌شود. این عوامل موجب تغییر در فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی می‌شود و کاهش توان ارتعاشات را در پی دارند. استفاده از مولدهای قدرت خود تنظیم فرکانس و بهینه کردن روش‌های کنترلی برای یافتن حالت کارکرد با بیشترین بازده ارتعاشات فراصوت از لازمه‌های پیشرفت در این فناوری است.

3- بزرگ‌نمایی ابعاد فرایند: بسیاری از فرایندها نظیر کشش عمیق و آهن‌گری براساس ابعاد قطعات صنعتی مورد استفاده در صناعی مانند اتومبیل و هوافضا نیاز به بزرگ‌نمایی دارند. ابعاد اغلب قطعات در این صنایع بسیار بزرگ‌تر از نمونه‌های مورد استفاده در اغلب تحقیقات ارائه شده است. در کنار استفاده از ترانس‌دیوسرهای توان بالا می‌توان از روش‌های نوین برای اعمال ارتعاشات فراصوت بر نواحی انتخابی و یا بحرانی تغییر شکل در قطعات و ابزارهای بزرگ‌تر بهره جست.

ابزار. این پارامترها از یکدیگر مستقل نیستند. برای نمونه انرژی فراصوت به رابطه توان-زمان و دامنه ارتعاش به مقدار توان ترانس‌دیوسر وابسته است. در ادامه برخی از پارامترها با شرح بیشتری مطرح می‌شوند.

نوع ماده: تاکنون اعمال ارتعاشات فراصوت بر مواد مختلفی از تک کریستال روی تا مواد پلی کریستال نظیر آلومینیوم خالص، آلومینیوم آلیاژی، آلیاژهای تیتانیوم، فولاد و ... انجام گرفته است. آن‌چه از نتایج برمی‌آید آلومینیوم خالص بهترین گزینه برای آغاز بررسی تأثیرگذاری ارتعاشات فراصوت در یک فرایند شکل‌دهی است.

نیروهای استاتیک شکل‌دهی و بزرگ‌نمایی بوستر یا هورن: مقدار بزرگ‌نمایی دامنه ارتعاش توسط بوستر یا هورن در میزان اعمال نیروهای استاتیک تأثیرگذار است. برای شرح بهتر اثر ضریب بزرگ‌نمایی دامنه نمونه‌ای بیان خواهد شد. بوستر یا هورن با ضریب بزرگ‌نمایی بالا مانند دنده پنج یک ماشین با سرعت بالا و گشتاور پایین عمل می‌کند. برعکس ضریب بزرگ‌نمایی پایین‌تر مانند حرکت ماشین در دنده یک (سنگین) با ایجاد سرعت کم اما گشتاور بالا عمل می‌نماید و دارای قابلیت اعمال نیروی زیاد است و تحت اعمال بار استاتیک صدها کیلوگرم ارتعاش می‌نماید. به همین دلیل در استفاده از یک هورن یا بوستر با بزرگ‌نمایی زیاد، در نیروهای استاتیک زیاد هورن از ارتعاش باز می‌ایستد، مانند یک ماشین که با دنده سه در یک سربالایی با شیب زیاد از حرکت باز می‌ایستد [5].

شکل 13 تأثیر ضریب بزرگ‌نمایی بوستر (1, 1.5, 2, 2.5) در تغییر نیروی مورد نیاز برای دستیابی به بیشینه نیروی استاتیک را نشان می‌دهد. در فرایندهای با نیروی استاتیک بالا برای اجتناب از افت شدید اثر ارتعاشات فراصوت باید از بوسترهای با ضریب بزرگ‌نمایی کمتر استفاده کرد. برای نمونه بوستر سبز رنگ با بزرگ‌نمایی 1 بیشترین نیروی استاتیک (خط سیاه ممتد در نمودار) و بوستر سیاه رنگ با بزرگ‌نمایی 2.5 بیشترین دامنه ارتعاش را نتیجه می‌دهد.

اعمال ارتعاشات به قطعه، ابزار یا قالب: انتخاب اعمال ارتعاشات مکانیکی به قطعه یا ابزار نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج حاصل است. به دلیل موقعیت ثابت قطعه‌کار، اغلب اعمال ارتعاشات به آن آسان‌تر از اعمال

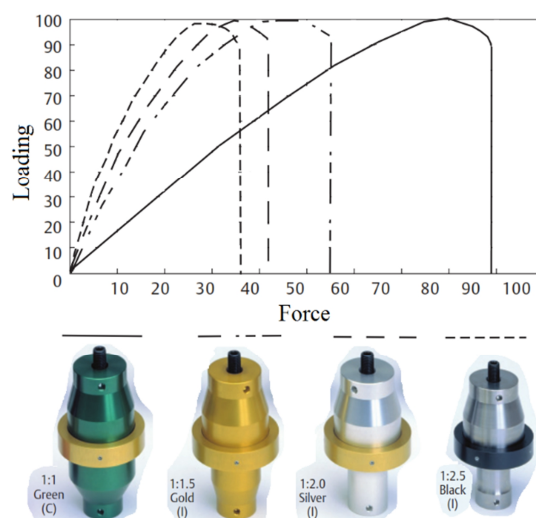


Fig. 13 Effect of amplitude increasing boosters gain (1, 1.5, 2, 2.5) on changing the force required to obtain peak loading [5]

شکل 13 تأثیر ضریب بزرگ‌نمایی بوستر (1, 1.5, 2, 2.5) در تغییر نیروی مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر نیروی استاتیک

جدول 1 خلاصه کاربردها، مکانیزم‌ها، مزایا و پارامترهای اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی

Table 1 Summary of the applications, mechanisms, advantages and parameters of Ultrasound-Assisted Forming Processes

کاربردها	مراجع	تأثیر/ مکانیزم	مزایا	پارامترها
آزمون کشش	[13] [14] [10] [35]	کاهش تنش تسلیم کاهش استحکام نهایی	کاهش نیروهای تغییر شکل	توان و دامنه ارتعاش نوع ماده
کشش عمیق و اسپینینگ لوله	[11] [16] [18] [19]	کاهش مقاومت تغییر شکل کاهش ضریب اصطکاک	افزایش حد شکل‌دهی کاهش احتمال پارگی افزایش LDR	توان و دامنه ارتعاش نیروی ورق‌گیر
چکش کاری فراصوت	[23] [24] [25] [26]	حذف تنش پسماند کششی ایجاد تنش پسماند فشاری	افزایش عمر خستگی افزایش مقاومت به خوردگی کاهش نیروهای کشش	توان و دامنه ارتعاش ابعاد پین و نیروی استاتیک
کشش سیم و لوله	[27] [28] [29] [30]	کاهش تنش سیلان کاهش ضریب اصطکاک	کاهش مراحل کشش افزایش عمر ابزار افزایش سرعت کشش بهبود کیفیت سطح افزایش کرنش شکست	توان و دامنه ارتعاش سرعت کشش سیم نیروی کشش
آهن‌گری و آزمون فشار	[11] [32] [33] [34]	کاهش تنش سیلان کاهش ضریب اصطکاک	کاهش نیروهای شکل‌دهی کاهش برگشت فنری	توان و دامنه ارتعاش نیروی استاتیک نوع ماده
متالورژی پودر	[36] [37] [38] [39] [40] [41]	کاهش تنش سیلان کاهش نیروهای اصطکاک حرکت حجمی ذرات	افزایش نرخ چگالش یکنواختی ساختار استحکام قطعه فشرده شده	توان و دامنه ارتعاش دمای عملیات
فرایندهای نوین	[43] [44] [46] [47] [48] [61]	کاهش تنش سیلان کاهش نیروهای اصطکاک	ریز دانه شدن مواد افزایش استحکام قطعه نهایی	توان و دامنه ارتعاش شکل ابزار و ابعاد قطعه

می‌دهد. با جمع‌بندی نتایج و بحث‌های ارائه‌شده در این مقاله جدول 1 خلاصه کاربردها، مکانیزم‌های تأثیرگذار، مزایا و پارامترهای اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای مختلف شکل‌دهی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای شکل‌دهی را می‌توان به شرح زیر ارائه کرد:

- ✓ در فرآیندهای شکل‌دهی به کمک فراصوت، ارتعاشات مکانیکی با دامنه و فرکانس مشخص به تمام یا بخشی از قطعه کار، قالب، ابزار و یا ترکیبی از آن‌ها در جهتی یا جهاتی مشخص اعمال می‌شود.
 - ✓ اثرات اعمال ارتعاشات فراصوت را می‌توان به اثرات سطحی و حجمی تقسیم بندی کرد. از مهم‌ترین اثرات سطحی، کاهش اصطکاک بین ذرات مواد و یا مواد با قالب و از مهم‌ترین اثرات حجمی می‌توان به کاهش تنش سیلان ماده اشاره کرد.
 - ✓ اثرات اعمال ارتعاشات فراصوت را می‌توان به اثرات هنگام اعمال ارتعاشات (کاهش تنش سیلان و کاهش اصطکاک) و اثرات پس از برداشتن ارتعاشات (سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی پسماند) تقسیم‌بندی کرد.
 - ✓ مهم‌ترین پدیده‌هایی که می‌توان اثرات حجمی ارتعاشات فراصوت را به آن‌ها نسبت داد عبارتند از: برهم‌نهی تنش‌های استاتیک و فراصوت، ایجاد و تسهیل در جابه‌جایی نابه‌جایی‌ها و افزایش دمای موضعی.
- برای این که بتوان به درستی این پدیده‌ها را توجیه کرد باید شرایط انجام آزمون شامل خصوصیات و پیشینه تغییر شکل پیشین ماده و پارامترهای شرایط محیطی (دما) و ارتعاشات فراصوت (فرکانس، توان و مود ارتعاش) را نیز در نظر گرفت.

4- زمینه‌های جدید تحقیق: همچنان که بزرگ‌نمایی یک نیاز برای گسترش فناوری فراصوت پرتوان است، کوچک کردن ابعاد برای استفاده در کاربردهایی نظیر میکروفرمینگ می‌تواند زمینه‌ای برای توسعه صنعتی فناوری فراصوت باشد، همچنین استفاده از فراصوت برای مواد جدید و یا بهبود کیفیت قطعات تولیدی به روش‌های صنعتی شکل‌دهی نیز زمینه مناسبی برای گسترش این فناوری است.

5- مدل‌سازی: مدل‌سازی فرایندهای شکل‌دهی به کمک ارتعاشات فراصوت برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی رفتار مواد در این زمینه استفاده می‌شود [60,59]. بدین منظور می‌توان از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند آباکوس¹، انسیس² و دی‌فرم³ بهره گرفت. جهت دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت لازم است از نتایج آزمون‌های تجربی مانند کشش و فشار به‌عنوان داده‌های ورودی در فرایند شبیه‌سازی استفاده شود.

6- استفاده از تجهیزات پیشرفته برای بررسی رفتار ماده: می‌توان از وسایل اندازه‌گیری نیروی لحظه‌ای با پاسخ فرکانسی زیاد برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر ابزار استفاده کرد تا تفکیک نیروی دو مکانیزم پیوسته و ضربه‌ای- ارتعاشی امکان‌پذیر باشد. برای بررسی‌های میکروسکوپی می‌توان از میکروسکوپ‌های الکترونی (پس از تغییر شکل) و میکروسکوپ‌های حرارتی (حین تغییر شکل) بهره گرفت.

7- نتیجه‌گیری

استفاده از ارتعاشات فراصوت هنگام عملیات شکل‌دهی مواد دارای مزایای قابل توجهی است که محققان و صنعت‌گران را به سمت استفاده از آن سوق

¹ ABAQUS

² ANSYS

³ DEFORM

8-مراجع

- [24] S. Statnikov, Guide for application of ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structures, *International Institute of Welding*, Vol. 1757, No. 99, pp. 1-17, 1999.
- [25] A. Abdullah, M. Malaki, A. Eskandari, Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening, *Materials & Design*, Vol. 38, No. 2, pp. 7-18, 2012.
- [26] R. abedini, A. Abdullah, *Design and Manufacturing of Ultrasonic Peening Gun*, MSc Thesis, Mechanical engineering, Amirkabir university of technology, Tehran, 2012. (in Persian فارسی)
- [27] N. Atanasiu, The wire drawing process with axial ultrasonic vibration of the die, *Ultrasonics*, Vol. 14, No. 2, pp. 69-72, 1976.
- [28] E. Lehfeltdt, Wire drawing with superimposed ultrasonic vibrations, *Wire Drawing*, Vol. 102, No. 1, pp. 205-213, 1969.
- [29] M. Murakawa, M. Jin, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process, *Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 81-86, 2001.
- [30] M. Hayashi, M. Jin, S. Thipprakmas, M. Murakawa, J.-C. Hung, Y.-C. Tsai, C.-H. Hung, Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM), *Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1, pp. 30-35, 2003.
- [31] A. Abdullah, M. Paknejad, S. Dashti, A. Pak, A. M. Beigi, Theoretical and experimental analyses of ultrasonic-assisted indentation forming of tube, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 3, pp. 388-398, 2014.
- [32] J.-C. Hung, C. Hung, The influence of ultrasonic-vibration on hot upsetting of aluminum alloy, *Ultrasonics*, Vol. 43, No. 8, pp. 692-698, 2005.
- [33] J.-C. Hung, Y.-C. Tsai, C. Hung, Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting, *Ultrasonics*, Vol. 46, No. 3, pp. 277-284, 2007.
- [34] Y. Daud, M. Lucas, Z. Huang, Superimposed ultrasonic oscillations in compression tests of aluminium, *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. 511-515, 2006.
- [35] Y. Daud, M. Lucas, Z. Huang, Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium, *Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp. 179-190, 2007.
- [36] E. Lehfeltdt, The effect of ultrasonic vibrations on the compacting of metal powders, *Ultrasonics*, Vol. 5, No. 4, pp. 219-223, 1967.
- [37] V. Pokryshev, V. Marchenko, Effect of ultrasound oscillations on the consolidation of iron powder in hot pressing, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 8, No. 2, pp. 110-112, 1969.
- [38] V. Pokryshev, M. Koval'chenko, V. Marchenko, Vacuum hot pressing of metal powders under the action of ultrasonic vibrations, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 10, No. 10, pp. 790-794, 1971.
- [39] W. Kromp, P. Trimmel, F. Prinz, J. Williams, Vibratory compaction of metal powders, *Modern Developments in Powder Metallurgy*, Vol. 15, No. 17, pp. 131-141, 1985.
- [40] K.-H. Staffa, P. Trimmel, W. Kromp, N. Claussen, Vibratory Hot Pressing of Spherical Copper Powder at 150 and 20000 Hz. Part II: Comparison of Experimental and Theoretical Results, *Powder Metallurgy International*, Vol. 18, No. 2, pp. 66-70, 1986.
- [41] J. Tsujino, N. Shimada, Y. Saotome, E. Sugimoto, Compacting of various metal, alloy and ceramic powder using 20 kHz ultrasonic vibration compacting equipments with upper and lower vibration punches, *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, Japan, pp. 1985-1988, 2009.
- [42] J. Tsujino, Compacting of various metal, alloy and ceramic powder using 20 kHz ultrasonic vibration compacting equipments with upper and lower vibration punches, *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp. 1985-1988, 2009.
- [43] Z. Yao, G.-Y. Kim, L. Faidley, Q. Zou, D. Mei, Z. Chen, Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting, *Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 3, pp. 640-646, 2012.
- [44] Z. Yao, G.-Y. Kim, L. Faidley, Q. Zou, D. Mei, Z. Chen, Micro pin extrusion of metallic materials assisted by ultrasonic vibration, *Proceeding of International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Pennsylvania, USA, October 12-15, 2010.
- [1] M. Lucas, A. Gachagan, A. Cardoni, Research applications and opportunities in power ultrasonics, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, No. 12, pp. 2949-2965, 2009.
- [2] O. V. Abramov, *High-intensity ultrasonics: theory and industrial applications*, pp. 15-21, CRC Press, USA, 1999.
- [3] D. Ensminger, *Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Applications*, pp. 45-110, Boca Raton: Taylor & Francis, 1988.
- [4] T. L. Matt Short, *Ultrasonics: Capabilities Overview*, EWI Advanced Ultrasonics, Accessed on 1 September 2010; <http://www.EWI.com>.
- [5] B. Branson, *Branson Technical Information*, Accessed on 20 September 2015; <http://www.emersonindustrial.com/en-US/branson/Pages/home>.
- [6] G. I. Prokopenko, O. I. Kozlov, J. I. Kleiman, P. P. Mischev, V. V. Knysh, Y. F. Kudryavtsev, *Device for ultrasonic peening of metals*, US Patents No. 6467321 B2, 2002.
- [7] A. Pak, A. Abdullah, Correct Prediction of the Vibration Behavior of a High Power Ultrasonic Transducer by FEM Simulation, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 1, pp. 21-28, 2008.
- [8] A. Abdullah, M. Shahini, A. Pak, An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer, *Electroceramics*, Vol. 22, No. 4, pp. 369-382, 2009.
- [9] J. A. Gallego-Juárez, K. F. Graff, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, First Edition, pp. 337-431, London: Elsevier Science, 2014.
- [10] B. Langenecker, Work-softening of metal crystals by alternating the rate of glide strain, *Acta metallurgica*, Vol. 9, No. 10, pp. 937-940, 1961.
- [11] I. Kristoffy, Metal forming with vibrated tools, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 91, No. 4, pp. 1168-1174, 1969.
- [12] V. Fartashvand, A. Abdullah, S. A. Sadough Vanini, Investigation of Ti-6Al-4V alloy Acoustic Softening, *Ultrasonics Sonochemistry*, Accepted Manuscript, 2016.
- [13] F. Blaha, B. Langenecker, Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration, *Naturwissenschaften*, Vol. 42, No. 556, pp. 1-10, 1955.
- [14] B. Langenecker, Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals, *IEEE transactions on sonics and ultrasonics*, Vol. SU-13, No. 1, pp. 1-8, 1966.
- [15] Y. Huang, Y. Wu, J. Huang, The influence of ultrasonic vibration-assisted micro-deep drawing process, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, No. 5-8, pp. 1455-1461, 2014.
- [16] I. Kristoffy, R. Kegg, R. Weber, *Influence of Vibrational Energy on Metalworking Processes*, Final Technical Report on AFML-TR-65-211, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, July, 1965.
- [17] T. Jimma, Y. Kasuga, N. Iwaki, O. Miyazawa, E. Mori, K. Ito, H. Hatano, An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process, *Materials Processing Technology*, Vol. 80, pp. 406-412, 1998.
- [18] M. sohrabifar, *Experimental Investigation of ultrasonic assisted deep drawing*, MSC Thesis, Mechanical engineering, Shahid rajayi, Tehran, Iran, 2010.
- [19] M. Rasoli, A. Abdullah, M. Farzin, A. F. Tehrani, A. Taherizadeh, Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process, *Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6, pp. 1443-1452, 2012.
- [20] M. Honarpisheh, V. Zandian, Investigation of residual stresses in stress-relieved samples by heat treatment and ultrasonic methods using hole-drilling method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 273-278, 2015. (in Persian فارسی)
- [21] M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi, Experimental evaluation of ultrasonic stress relieving on steel specimens considering grain size effect, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 21-33, 2012. (in Persian فارسی)
- [22] M. Malaki, H. Ding, A review of ultrasonic peening treatment, *Materials & Design*, Vol. 87, pp. 1072-1086, 12/15/, 2015.
- [23] E. S. Statnikov, O. V. Korolkov, V. N. Vityazev, Physics and mechanism of ultrasonic impact, *Ultrasonics*, Vol. 44, No. 1, pp. 533-538, 2006.

- [53] H. Huang, A. Pequegnat, B. Chang, M. Mayer, D. Du, Y. Zhou, Influence of superimposed ultrasound on deformability of Cu, *Applied Physics*, Vol. 106, No. 11, pp. 113514, 2009.
- [54] G. Nevill, F. R. Brotzen, The effect of vibrations on the static yield strength of a low-carbon steel, *Proceeding-American Society for Testing Material*, Vol. 57, pp. 751-758, 1957.
- [55] O. Izumi, K. Oyama, Y. Suzuki, Effects of superimposed ultrasonic vibration on compressive deformation of metals, *Transactions of the Japan institute of metals*, Vol. 7, No. 3, pp. 162-167, 1966.
- [56] R. Mignogna, R. Green, J. Duke, E. Henneke, K. Reifsnider, Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials, *Ultrasonics*, Vol. 19, No. 4, pp. 159-163, 1981.
- [57] A. Puskar, *The use of high-intensity ultrasonics*, pp. 30-70, Elsevier Scientific Publishing Company, USA, 1982.
- [58] V. P. Severdenko, V. V. Klubovich, A. V. Stepanenko, *Ultrasonic rolling and drawing of metals*, New York: Consultants Bureau, 1972.
- [59] A. Siddiq, T. El Sayed, Ultrasonic-assisted manufacturing processes: variational model and numerical simulations, *Ultrasonics*, Vol. 52, No. 4, pp. 521-9, Apr, 2012.
- [60] A. Siddiq, T. El Sayed, Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM, *Materials Letters*, Vol. 65, No. 2, pp. 356-359, 2011.
- [61] M. Vahdati, R. Mahdavi, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop "ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming" process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 68-76, 2015. (in Persian فارسی)
- [45] M. Vahdati, R. Mahdavi, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 68-76, 2015. (in Persian فارسی)
- [46] M. Vahdati, R. Mahdavi, S. Amini, Statistical Analysis and Optimization of Factors Affecting the Spring-back Phenomenon in UVaSPIF Process Using Response Surface Methodology, *Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 13-23, 2015.
- [47] F. Ahmadi, M. Farzin, M. Meratian, S. Loeian, M. Forouzan, Improvement of ECAP process by imposing ultrasonic vibrations, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, No. 1-4, pp. 503-512, 2015.
- [48] F. Ahmadi, M. Farzin, Finite element analysis of ultrasonic-assisted equal channel angular pressing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, No. 11, pp. 1859-1868, 2014.
- [49] R. Pohlman, E. Lehfelddt, Influence of ultrasonic vibration on metallic friction, *Ultrasonics*, Vol. 4, No. 4, pp. 178-185, 1966.
- [50] S. Dong, M. J. Dapino, Elastic-plastic cube model for ultrasonic friction reduction via Poisson's effect, *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 343-350, 2014.
- [51] V. Kumar, I. Hutchings, Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, *Tribology International*, Vol. 37, No. 10, pp. 833-840, 2004.
- [52] B. Langenecker, Work hardening of zinc crystals by high-amplitude ultrasonic waves, *Proceeding of American Society of Test of Materials*, Vol. 61, No. 1, pp. 602-609, 1962.