

کاربرد روش اجزاء محدود در طراحی و ارزیابی عملکرد هورن برش فراصوتی

وچید فرتاش‌وند استادیار دانشگاه الزهراء (س) V.fartashvand@alzahra.a c.ir	علی محمدی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر alimohammadi97@aut.ac. ir	محمد ابراهیم سیاهکوهی کارشناسی دانشگاه علم و صنعت ایران m.e.siahkoohi@gmail.com om	رضوان عابدینی* استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران rezvanabedini@iust.ac.i r
--	--	--	--

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰

چکیده

برش مواد یکی از فرایندهای پرکاربرد صنعتی می‌باشد که همواره با چالش‌هایی همراه است. یکی از این چالش‌ها قابلیت برش مواد با قابلیت کشسانی بالا مانند لاستیک و یا مواد نرم و ترد مانند کیک است. به منظور بالا بردن طول عمر ابزار و دستیابی به سطح برش مناسب و دقیق و دستیابی به سرعت برش بالا از فناوری ارتعاشات توان بالای فراصوتی در صنایع مدرن تولید تایر و لاستیک و صنایع غذایی استفاده می‌شود. طراحی مناسب ابزار برش فراصوتی تضمین‌کننده عملکرد مناسب و طول عمر ابزار است. طراحی و ساخت هورن‌های برشی فراصوتی به دلیل تأثیرگذاری عوامل متنوع در شکل و ابعاد قطعه از پیچیدگی‌هایی برخوردار است. در مقاله حاضر اثر پارامترهای ابعادی طراحی هورن، بر دو عامل خروجی مهم یعنی فرکانس تشدید شکل مود ارتعاش طولی و یکنواختی ارتعاشات سطح جلو تیغه برش فراصوتی از جنس آلایژ تیتانیوم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با استفاده از بهبود طراحی در نرم‌افزارهای اجزاء محدود می‌توان به یک تیغه برشی با فرکانس نزدیک به فرکانس نامی طراحی و با بیشترین یکنواختی دامنه ارتعاشی در سطح جلو هورن دست یافت.

واژگان کلیدی: ارتعاشات توان بالای فراصوتی، تیغه برش فراصوتی، فرکانس تشدید، یکنواختی دامنه ارتعاشات، شبیه‌سازی

۱. مقدمه

و یا خردشدگی و چسبیدن مواد غذایی به تیغه برنده برشی از چالش‌های مهم در این صنایع در مرحله برش است. یک راهکار نوین برای فائق آمدن بر این محدودیت‌ها استفاده از

برش مواد مختلف مانند لاستیک و یا مواد غذایی مانند انواع کیک، شیرینی و بیسکویت همواره با چالش‌هایی همراه بوده است. چسبیدن و پارگی لاستیک در تماس با تیغه برش معمول

ارتعاشات توان بالای فراصوتی در برش انواع مواد لاستیکی و یا مواد غذایی است [۱]. دستیابی به برش‌های بسیار نازک و دقیق به دلیل کاهش مقاومت روی سطح ماده و کاهش اصطکاک امکان‌پذیر می‌گردد [۲]. به دلیل فرکانس بالای ارتعاشات فراصوتی، می‌توان فشار روی سطح برش ماده مورد نظر را کاهش داد و این مورد یک سطح برش تمیز ایجاد می‌کند. دستیابی به برش پاک‌تر و تمیزتر، زمان برش کمتر، برش بهداشتی‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر، قوام بیشتری در سطح برش تیغه‌ها و مدت زمان طولانی‌تر دوره تیز نمودن تیغه‌ها از مهم‌ترین مزایای استفاده از چاقوهای برش فراصوتی است [۳]. برای سایر مزایای فرایند برش فراصوتی نسبت به برش‌های سنتی می‌توان به پایداری بالا، برش منظم، ایمنی و حفاظت از محیط‌زیست و همچنین عدم نفوذ گرما و حرارت به محصول، به دلیل سرد ماندن محصول، در اثر برش فراصوتی اشاره کرد [۳].



شکل ۱. کاربرد چاقوی برش فراصوتی در برش کیک [۱]



شکل ۲. کاربرد چاقوی برش فراصوتی در برش لاستیک [۵]

ابزارهای برش مواد غذایی فراصوتی اغلب برای برش انواع مواد غذایی همانند پنیرهای سفت و نرم، آجیل‌ها و میوه‌ها، گوشت‌های تازه، منجمد و یخ‌زده و سبزی‌های منجمد و تازه و انواع کیک، شیرینی، نان و ... استفاده می‌شوند. همچنین تیغه‌های برش فراصوت کاربرد فراوانی در برش انواع لاستیک‌ها در صنعت تولید تایر دارند [۴]. شکل ۱ نمای یک تیغه برش فراصوتی در کاربرد برش کیک [۱] و شکل ۲ نمای یک تیغه برش در کاربرد لاستیک [۵] را نمایش داده است.

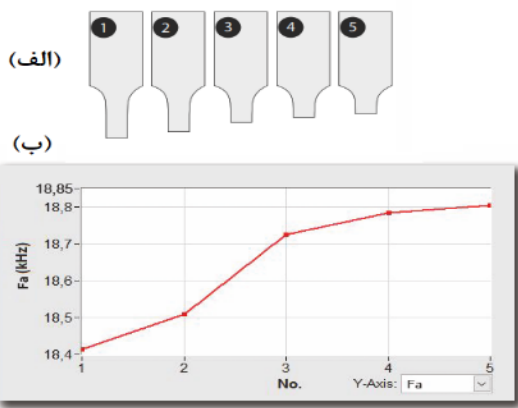
با توسعه فناوری ارتعاشات توان بالای فراصوتی در صنایع مختلف، اثر ارتعاشات در بسیاری از فرایندها مانند شکل‌دهی [۶ و ۷]، ماشین‌کاری [۸]، جوشکاری [۹] و حتی در جراحی پزشکی [۱۰] مورد توجه محققان قرار گرفت. طراحی درست ابزار برش فراصوتی اهمیت بالایی در عمر و بازده عملکرد آن حین عملیات برش دارد. در صورت عدم طراحی درست به شدت کیفیت برش حاصل و عمر تیغه برش تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. افشاری و آرزو [۱۱] یک نرم‌افزار برای طراحی بهینه هورن‌های جوش پلاستیک پیشنهاد دادند. رفتار ارتعاشی نمونه‌های ساخته شده تعیین و نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی صحنه‌گذاری گردید. مهم‌ترین مشخصه‌های مورد ارزیابی عبارت بودند از یکنواختی دامنه ارتعاش جلو هورن، فرکانس تشدید شکل مود طولی ارتعاش، جداسازی فرکانس اصلی از سایر فرکانس‌ها، ضریب افزایش دامنه و حداکثر تنش ایجاد شده در هورن.

دیل انسمینگر روابط تحلیلی در زمینه طراحی انواع هورن‌های تبری^۱ و بلوکی^۲ جوش پلاستیک را پیشنهاد داد [۱۲]. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در این زمینه شامل جنس مواد، ابعاد سطح جلو هورن و ابعاد و موقعیت شیارها بوده است. اهداف اصلی در طراحی تیغه برش فراصوتی، دستیابی به فرکانس تشدید مطلوب و یکنواختی ارتعاش در سطح جلو تیغه برنده است.

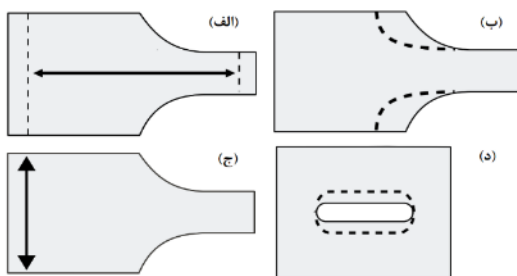
نیاز به در نظر گرفتن خواص الاستیک و فیزیکی، طول و هندسه هورن دارد.

شکل ۳ اثر طول هورن را بر فرکانس تشدید آن نشان داده است. همان طور که ملاحظه می شود با کاهش طول هورن فرکانس تشدید آن افزایش یافته است [۱۳]. از آنجاکه فرکانس تشدید طولی با جرم و طول قطعه رابطه عکس دارد این نتیجه قابل پیش بینی است اما در قطعات پیچیده و با ویژگی های شکلی مختلف تعیین رفتار فرکانسی به راحتی انجام پذیر نخواهد بود.

شکل ۴ اثر برخی مؤلفه های ابعادی را بر فرکانس تشدید نهایی در شکل مود طولی نشان داده است. به طور کلی کاهش طول کلی قطعه (شکل ۴-الف) موجب افزایش فرکانس تشدید مود ارتعاش طولی و کاهش عرض/قطر بالای قطعه، افزایش عرض شیار و بالا رفتن موقعیت تغییر قطر/عرض در هورن (به ترتیب شکل ۴-ب الی ۴-د) موجب کاهش فرکانس تشدید آن می گردند.



شکل ۳. اثر طول هورن بر فرکانس تشدید [۱۳]



شکل ۴. اثر مؤلفه های ابعادی هورن بر فرکانس تشدید نهایی [۱۳]

باتوجه به این که تیغه برنده فراصوتی دارای شکل نسبتاً پیچیده و ویژگی های شکلی^۳ متعدد است، طراحی آن فرایندی زمان بر است و با عدم شناخت درست از اثر هر کدام از پارامترهای طراحی، به طور معمول دستیابی به شکل و ابعاد بهینه امکان پذیر نخواهد بود.

در زمینه طراحی و بهبود ویژگی های عملکردی انواع هورن های برش فراصوتی پژوهشی انجام نشده است. در این پژوهش طراحی یک نمونه تیغه برش فراصوتی از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با هدف دستیابی به فرکانس نزدیک به ۴۰ کیلوهرتز و یکنواختی ارتعاش شکل مود طولی سطح جلو تیغه برنده مدنظر قرار گرفته است. اثر پارامترهای مختلف در ابعاد و ویژگی های شکلی مهم طراحی در هر دو عامل مورد بررسی قرار گرفته است و نمودارهای مربوطه رسم گردیده است.

۲. اصول طراحی ابزار برش فراصوتی

اجزای اصلی یک مجموعه برش فراصوتی شامل منبع تغذیه، مبدل (ترنسدیوسر)^۴ فراصوتی، تقویت کننده (بوستر)^۵ و ابزار (هورن)^۶ برش فراصوتی است. منبع تغذیه^۷ فراصوتی برق شهر را تبدیل به جریان الکتریکی با فرکانس بالا و ولتاژ بالا و قابل تنظیم می کند. مبدل فراصوتی^۸ انرژی الکتریکی فرکانس بالا و ولتاژ بالایی که توسط ژنراتور تأمین می شود را به ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا و اغلب در جهت طولی تبدیل می کند. تقویت کننده فراصوتی (بوستر) وظیفه تقویت دامنه ارتعاشی منتقل شده از مبدل فراصوتی به ابزار ارتعاشی را بر عهده دارد.

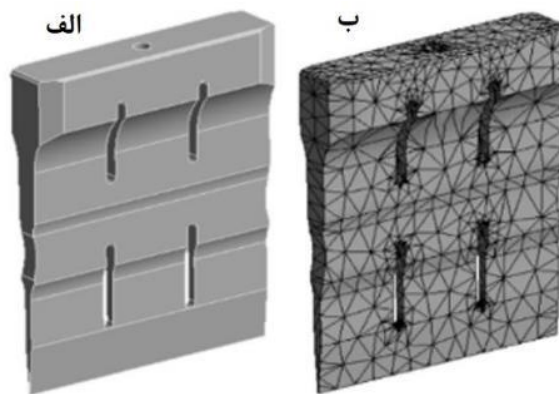
ابزار برش فراصوتی (هورن) یک قطعه با شکل خاص است که در یک فرکانس خاص ارتعاش می کند. این ابزار با استفاده از مدل سازی کامپیوتری برای بهترین عملکرد و طول عمر مناسب طراحی می شوند. فرکانس تشدید ابزار برش فراصوتی باید مطابق با فرکانس منبع تغذیه باشد که این روش تنظیم

۳. مدل سازی و شبیه سازی

در شبیه سازی اجزاء محدود، فرکانس های طبیعی و مدهای ارتعاشی از طریق تحلیل مودال تعیین می شوند. در طراحی هایی که برای هورن های برش فراصوتی انجام می شود برای رسیدن به مود طولی مدنظر حتما باید دو نکته زیر رعایت شوند:

۱. مود طولی موردنظر هورن فراصوتی طراحی شده نزدیک به فرکانس نامی ۴۰ کیلوهرتز باشد.
۲. در هورن برش فراصوتی طراحی شده در محدوده فرکانسی موردنظر در انتهای هورن (نوک تیغه) مود ارتعاشات طولی یکنواخت (بالای ۹۰ درصد) وجود داشته باشد.

هورن مدنظر برای طراحی و شبیه سازی دارای دو گره ارتعاشی و با طول یک طول موج است. در طراحی مفهومی، ابعاد



شکل ۵. الف) نمایی طراحی CAD هورن برش فراصوتی و ب) نمای مش خورده قطعه در نرم افزار انسیس

حدودی هورن طراحی شده اند. برای تعیین ابعاد دقیق و نقشه جزئی هورن، شبیه سازی اجزاء محدود توسط ماژول تحلیل مودال در نرم افزار انسیس ورک بنچ^۹ انجام شده است. در بخش شبیه سازی ابتدا اثر تغییر هر یک از ابعاد بر خروجی فرکانس تشدید حاصل و یکنواختی دامنه ارتعاش سطح جلو مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت مدل بهبود یافته اولیه ساخته شده و نتیجه فرکانس تشدید حاصل با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است. طراحی اولیه هورن در نرم افزار سالینورکز^{۱۰} در شکل ۵- الف و نمای مش خورده قطعه را در محیط نرم افزار انسیس در شکل ۵- ب نشان داده شده است.

پرداخته می شود و تأثیر پارامترها بر روی یکنواختی نیز بررسی می شوند و در نمودارهای مختلف این تغییر نشان داده خواهد شد. رابطه ۱ نحوه محاسبه یکنواختی دامنه ارتعاش سطح جلو تیغه برشی فراصوتی را بیان نموده است.

$$Amplitude\ uniformity = \frac{U_{min}}{U_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

در رابطه ۱ مقادیر U_{min} و U_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل دامنه ارتعاش کل نقاط لبه برنده تیغه برش هورن در مدهای طولی هستند. عناصر و پارامترها باید به گونه ای

تعداد ۲۰ مود بین فرکانس های ۳۵ کیلوهرتز تا ۴۵ کیلوهرتز در نرم افزار انسیس (حول فرکانس هدف ۴۰ کیلوهرتز) در نظر گرفته می شود و سپس مود طولی مدنظر از بین آنها یافت می شود. هرچه فرکانس تشدید این مود طولی به ۴۰ کیلوهرتز یعنی فرکانس هدف نزدیک تر باشد مطلوب تر است.

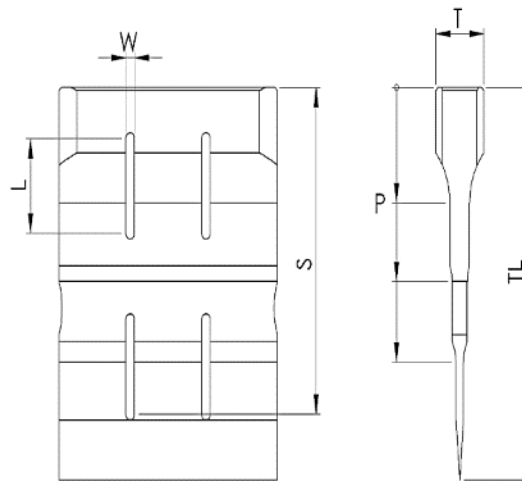
در ابتدا به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر تغییر فرکانس تشدید پرداخته می شود و نشان داده می شود که با افزایش یا کاهش هر پارامتر فرکانس تشدید قطعه کار چگونه تغییر می کند. پس از آن به یکنواختی دامنه^{۱۱} ارتعاش کل

برش فراصوتی و علامت اختصار آنها در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۶ پارامترهایی که در این مقاله برای طراحی هورن برش فراصوتی مدنظر بررسی خواهند شد را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

طراحی و یا حذف شوند که این مقدار به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر بشود (یکنواختی بالای ۹۰ درصد قابل قبول). علاوه بر این، فرکانس طبیعی طولی هورن برش باید نزدیک فرکانس تشدید هدف باشد [۷]. پارامترهای مهم ورودی (مستقل) و خروجی (وابسته) در طراحی و کاربرد سیستم‌های

جدول ۱. پارامترهای ورودی و خروجی در طراحی و کاربرد سیستم‌های برش فراصوتی و علامت اختصار آنها

پارامترهای خروجی (وابسته)	پارامترهای ورودی (مستقل)	نماد پارامتر
فرکانس تشدید هدف	فاصله شیارها تا بالای قطعه کار	S
	عرض شیارها	W
	طول شیارها	L
	تغییر جنس ماده قطعه کار	---
یکنواختی دامنه	ضخامت جانبی بالاترین قسمت قطعه	T
	طول کلی قطعه کار	TL
	موقعیت پله‌ها	P

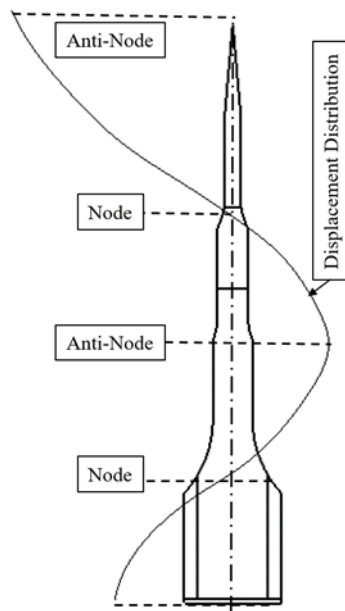


شکل ۶. شماتیک علامت اختصاری پارامترهای مؤثر بر طراحی هورن برش فراصوتی

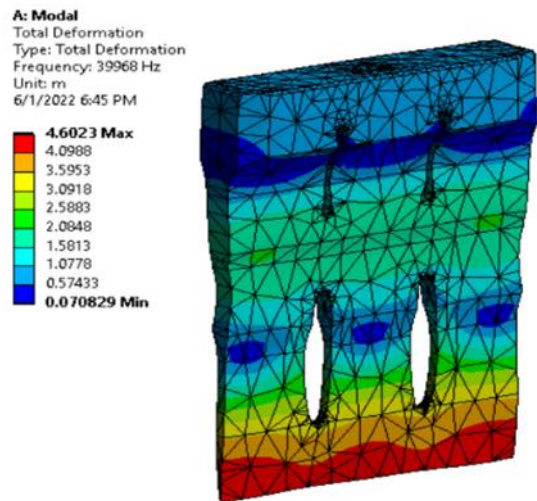
ارتعاش طولی مدنظر از تیغه برش فراصوتی با ماده Ti-6Al-4V را نمایش می‌دهد که در فرکانس ۳۹۹۶۸Hz اتفاق افتاده است. در حالت بهینه طراحی، در این شکل پارامترهای S، W، TL، T، P و به ترتیب عبارتند از ۱۱۰، ۴، ۳۲، ۲۲، ۱۳۲، ۳۹ میلی‌متر.

۴. نتایج و بحث

در بخش نتایج ابتدا شکل مود ارتعاشی حالت بهینه به عنوان نمونه ارائه شده است. سپس اثر تغییر هر یک از پارامترهای بیان شده در بخش طراحی بر فرکانس تشدید شکل مود طولی ارتعاش تیغه برشی فراصوتی نشان داده است. شکل ۷ مود



شکل ۸. نمای مود طولی ارتعاش تیغه برش فراصوتی به همراه نمایش نمودار توزیع جابه‌جایی طولی



شکل ۷. مود طولی مدنظر تیغه برش فراصوتی با آلیاژ Ti-6Al-4V در فرکانس ۳۹۹۶۸ هرتز

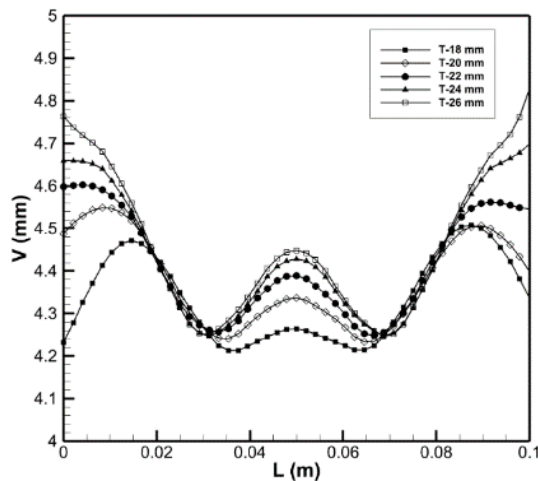
شکم ارتعاشی (Anti-Node) است که مطابق نمودار توزیع جابه‌جایی بیشترین دامنه جابه‌جایی طولی را در طول تیغه دارد. در ادامه و در بخش بررسی هر پارامتر ورودی، دو نمودار خروجی قرار گرفته است. نمودار اول فرکانس تشدید حاصل برحسب تغییر پارامترهای ابعادی تیغه برش فراصوتی و نمودار دوم به بررسی یکنواختی جلوی تیغه برحسب حالات مختلف تغییر پارامترها با هم در یک نمودار می‌پردازد. در بررسی هر کدام از پارامترهای ابعادی، براساس ابعاد ارائه شده در شکل ۷، مقادیر پارامتر اصلی مورد نظر بررسی شده است و مقادیر سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

۴-۱. اثر ضخامت جانبی بالاترین قسمت تیغه برش فراصوتی (T)

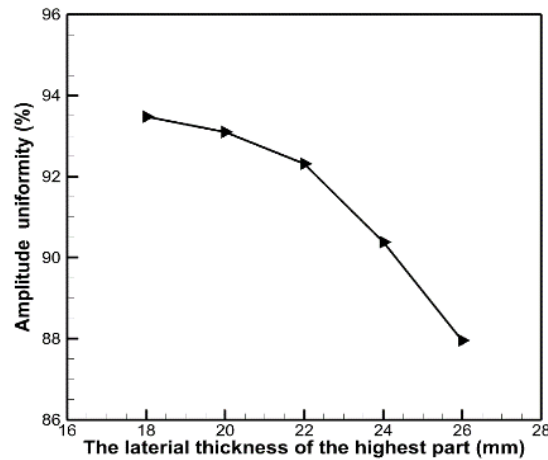
نسبت سطح بالای هورن به ضخامت سطح مرتبط با قطعه کار با میزان بزرگ‌نمایی دامنه (بهره) در هورن ارتباط مستقیم دارد و از اهمیت بالایی برخوردار است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، هر دو شرط مدنظر رعایت شده است. یعنی مود طولی یکنواختی وجود دارد زیرا نوک تیغه تماماً در یک محدوده رنگی بیانگر میزان جابه‌جایی (رنگ قرمز) قرار دارد. همچنین فرکانس تشدید شکل مود طولی تیغه برش فراصوتی در محدوده فرکانس ۴۰ kHz قرار دارد. ناحیه با رنگ آبی پررنگ در شکل ۷ نشان‌دهنده گره ارتعاشی (ناحیه با کمترین دامنه ارتعاش) است. در اینجا دو عدد گره وجود دارد روی دو عدد از پله‌ها چون طول قطعه برابر یک طول موج کامل یا دو برابر و نیم طول موج است. این گره‌ها وقتی دقیقاً روی پله‌ها قرار می‌گیرند یعنی این قطعه کار بیشترین بهره را دارا است.

شکل ۸ نمای شکل مود ارتعاش طولی تیغه برشی فراصوتی را نمایش داده است. در طول تیغه دو گره ارتعاشی (Node) وجود دارد که برای دستیابی به حداکثر دامنه ارتعاش گره‌ها در موقعیت پله‌های تغییر ضخامت قرار گرفته‌اند. انتهای تیز تیغه که کار برش را انجام می‌دهد

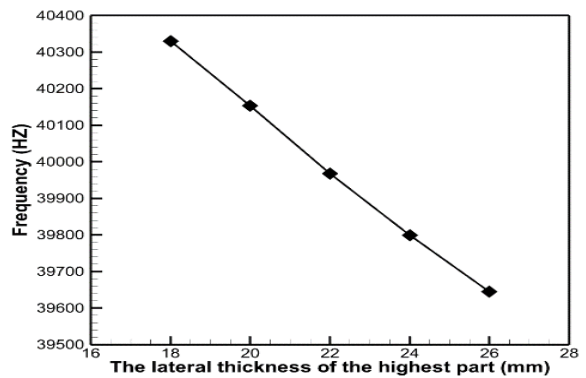


شکل ۱۰. نمودار جابه‌جایی ارتعاشی سطح جلوی تیغه هورن برش فراصوتی بر حسب حالات مختلف ضخامت جانبی بالای تیغه



شکل ۱۱. نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برش بر حسب ضخامت جانبی بالاترین قسمت هورن (۱۸ الی ۲۶ میلی‌متر)

در این بخش پنج سطح ضخامت ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۶ میلی‌متر برای سطح بالای هورن انتخاب شده است. شکل ۹ تأثیر ضخامت سطح بالای هورن برشی را بر فرکانس تشدید شکل مود ارتعاش طولی نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش ضخامت سطح بالای تیغه برشی از ۱۸ به ۲۶ میلی‌متر فرکانس تشدید شکل مود طولی را کاهش می‌دهد.

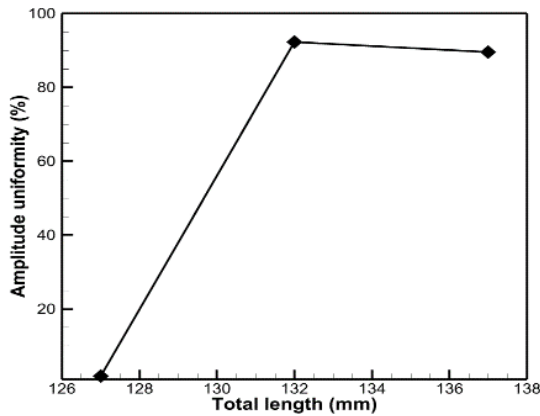


شکل ۹. نمودار فرکانس تشدید بر حسب ضخامت جانبی بالاترین قسمت هورن برش فراصوتی (۱۸ الی ۲۶ میلی‌متر)

شکل ۱۰، به‌عنوان نمونه نمودار جابه‌جایی ارتعاشی سطح جلو تیغه برشی را در اندازه‌های مختلف ضخامت جانبی بالای هورن برش فراصوتی نشان داده است. شکل ۱۱، نمودار تغییر یکنواختی، رابطه ۱ جلوی تیغه بر حسب ضخامت جانبی را نمایش داده است. ملاحظه می‌شود افزایش ضخامت جانبی بالاترین قسمت قطعه کار، یکنواختی وسط و لبه‌های تیغه هورن برش را کاهش می‌دهد.

۴-۲. اثر طول کلی تیغه برش فراصوتی (TL)

طول کلی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرکانس تشدید شکل مود طولی ارتعاش است. برای بررسی اثر طول کلی سه اندازه ۱۲۷، ۱۳۲ و ۱۳۷ میلی‌متر مدنظر قرار گرفته است. در هر سه اندازه طراحی با تغییر طول کلی قطعه کار تأثیر بر روی فرکانس تشدید و یکنواختی دامنه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۲ نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب تغییر طول کلی قطعه کار است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش طول کلی قطعه کار فرکانس تشدید شکل مود طولی را کاهش می‌دهد.

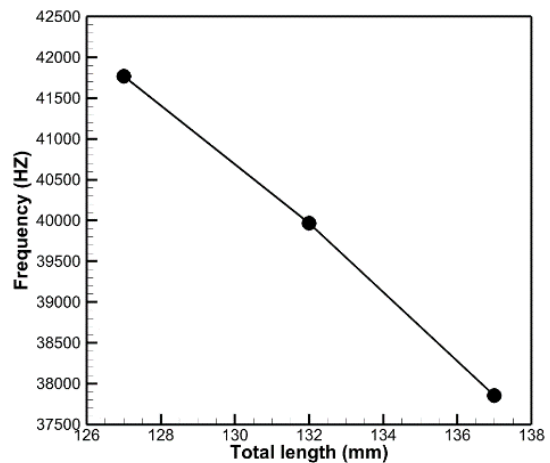


شکل ۱۳. نمودار تغییر یکنواختی جلوی قطعه کار برحسب تغییر طول کلی قطعه کار (۱۲۷ الی ۱۳۷ میلی‌متر)

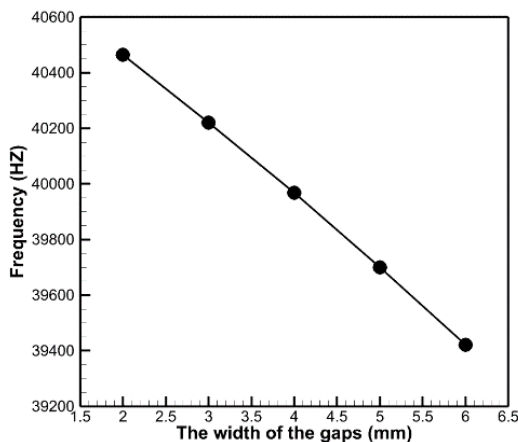
۴-۳. اثر عرض شیارها (W)

برای پنج حالت طراحی تأثیر پارامتر عرض شیارها بررسی و با تغییر عرض شیارها تأثیر بر روی فرکانس تشدید و یکنواختی سطح جلو تیغه برشی فراصوتی مورد بررسی قرار گرفته است. عرض شیارهای روی قطعه کار به ترتیب برابر ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر است.

در شکل ۱۴ نمودار تغییر فرکانس تشدید شکل مود طولی تیغه برشی فراصوتی را برحسب تغییر عرض شیارها نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش عرض شیارها فرکانس تشدید تیغه برشی را کاهش می‌دهد.



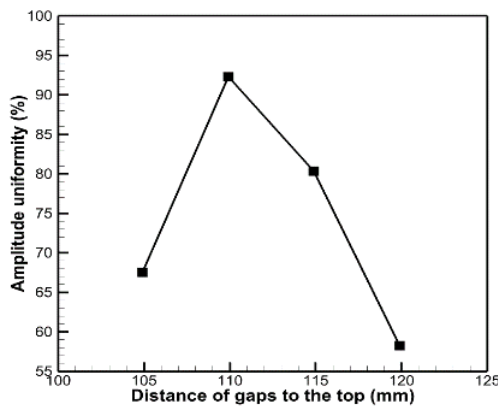
شکل ۱۲. نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب طول کلی قطعه کار (۱۲۷ الی ۱۳۷ میلی‌متر)



شکل ۱۴. نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب عرض شیارها (۲ الی ۶ میلی‌متر)

شکل ۱۳ نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب طول کلی قطعه کار را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش طول کلی قطعه کار یکنواختی وسط و لبه‌های تیغه هورن برش نیز به‌طور کلی افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود قطعه با طول ۱۳۲ میلی‌متر دارای نزدیک‌ترین فرکانس تشدید به فرکانس نامی طراحی و بالاترین یکنواختی ارتعاشات (۹۳ درصد) در تیغه برشی فراصوتی است.

شکل ۱۷ نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب تغییر فاصله شیارها تا بالای قطعه کار را نشان داده است. مشاهده می شود افزایش فاصله شیارها تا بالای قطعه کار باعث می شود تا یکنواختی وسط و لبه های تیغه به طور کلی کاهش یابد. طراحی بهینه براساس نزدیکی به فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و بالاترین یکنواختی هورن با فاصله شیارهای ۱۱۰ میلی متر، و در باقی موارد فرکانس از مقدار نامی دور شده و یکنواختی ارتعاشات کاهش یافته است.

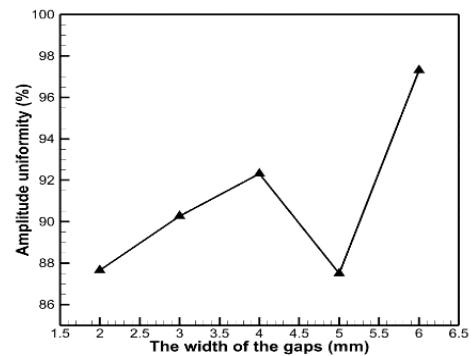


شکل ۱۷. نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب فاصله شیارها تا بالای قطعه کار (۱۰۵ الی ۱۲۰ میلی متر)

۴-۵. اثر طول شیارها (L)

برای بررسی اثر طول شیارها، در پنج حالت طراحی با تغییر طول شیارها تأثیر بر روی فرکانس تشدید و یکنواختی دامنه مورد بررسی قرار گرفت. طول شیارهای روی قطعه کار به ترتیب برابر ۲۶، ۲۹، ۳۲، ۳۵ و ۳۸ میلی متر انتخاب شد که در شکل ۱۸ مشاهده می شود. همان طور که ملاحظه می شود، افزایش طول شیارها فرکانس تشدید را کاهش می دهد.

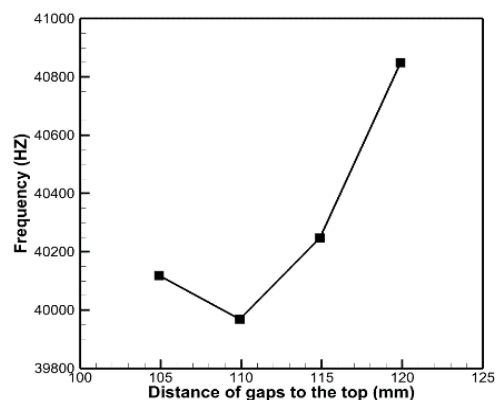
شکل ۱۵ تغییر یکنواختی سطح جلوی تیغه برحسب عرض شیارها را نشان داده است. ملاحظه می شود افزایش عرض شیارها، موجب افزایش یکنواختی وسط و لبه های تیغه هورن برش می گردد (به جز در نمونه با عرض شیار ۵ میلی متر).



شکل ۱۵. نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب عرض شیارها (۲ الی ۶ میلی متر)

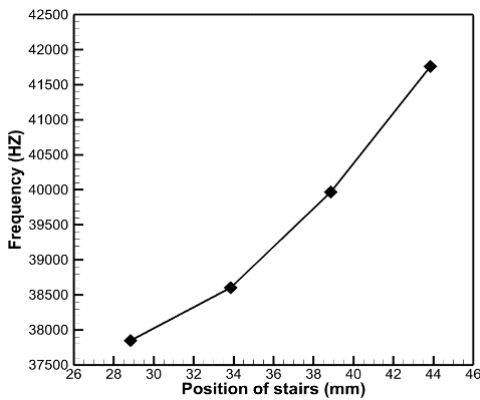
۴-۴. اثر فاصله شیارها تا بالای قطعه کار (S)

برای چهار حالت طراحی تأثیر پارامتر فاصله شیارها تا بالای قطعه کار بررسی شدند و در هر چهار حالت طراحی با تغییر فاصله شیارها تا بالای قطعه کار (به ترتیب ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۵ و ۱۲۰ میلی متر) تأثیر ابعاد بر روی فرکانس تشدید و یکنواختی جلو تیغه برشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نمودار نشان داده است که با افزایش فاصله بین شیارها و بالای تیغه، با دور شدن از اندازه بهینه ۱۱۰ میلی متر، فرکانس تشدید افزایش یافته است.



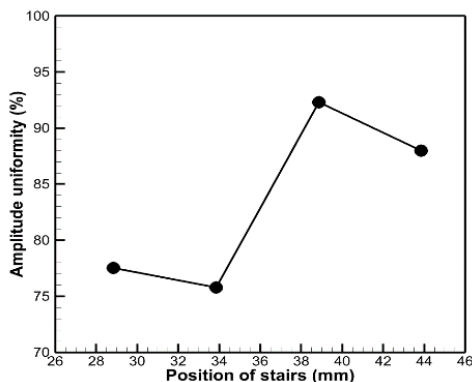
شکل ۱۶. نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب فاصله شیارها تا بالای قطعه کار (۱۰۵ الی ۱۲۰ میلی متر)

و با تغییر موقعیت پله‌ها بر روی قطعه کار تأثیر بر روی فرکانس تشدید و یکنواختی دامنه مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۲۰ نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب تغییر موقعیت پله‌های قطعه کار است. افزایش فاصله تمامی پله‌ها تا بالای قطعه کار فرکانس تشدید را افزایش می‌دهد.

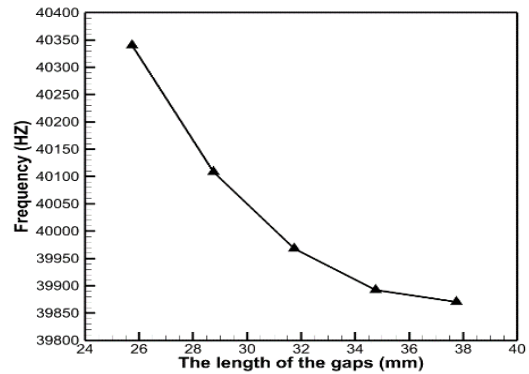


شکل ۲۰. نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب موقعیت پله‌ها روی تیغه برشی (۲۹ الی ۴۴ میلی‌متر)

شکل ۲۱ نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب موقعیت پله‌ها روی قطعه کار را نمایش می‌دهند. همان‌طور که قابل مشاهده است تغییر فاصله پله‌ها از بالای سطح هورن برشی فراصوتی رفتار یکنواختی را پیروی نمی‌کند. درعین حال موقعیت برابر ۳۹ میلی‌متر نزدیک‌ترین فرکانس تشدید به فرکانس نامی و بالاترین یکنواختی دامنه ارتعاشات ۹۳ درصد را دارا است.

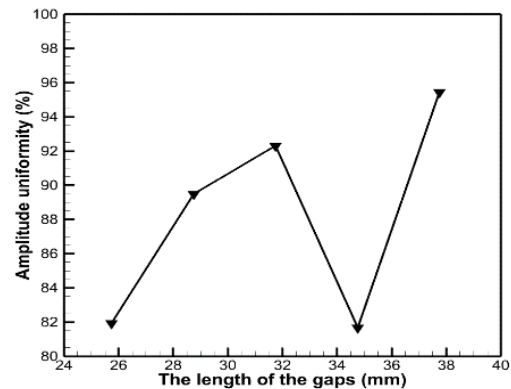


شکل ۲۱. نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب تغییر موقعیت پله‌ها (۲۹ الی ۴۴ میلی‌متر)



شکل ۱۸. نمودار تغییر فرکانس تشدید برحسب طول شیارها (۲۶ الی ۳۸ میلی‌متر)

شکل ۱۹، نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب تغییر طول شیارها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است افزایش طول شیارها باعث می‌شود یکنواختی وسط و لبه‌های تیغه هورن برش به‌طور کلی افزایش یابد. ملاحظه می‌شود طول شیار ۳۲ میلی‌متر دارای نزدیک‌ترین فرکانس تشدید به فرکانس نامی و یکنواختی دامنه ارتعاشات بالای ۹۳ درصد است.



شکل ۱۹. نمودار تغییر یکنواختی جلوی تیغه برحسب طول شیارها (۲۶ الی ۳۸ میلی‌متر)

۴-۶. اثر موقعیت پله‌ها بر روی تیغه برش فراصوتی (P)

برای بررسی اثر موقعیت پله‌ها، فاصله پله‌ها از سطح بالای هورن برشی فراصوت در چهار سطح برابر ۲۹، ۳۴، ۳۹ و ۴۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر اندازه، تأثیر پارامتر موقعیت پله‌ها بر روی هورن برش فراصوتی بررسی می‌شوند

۴-۷. اثر تغییر جنس ماده تیغه برش فراصوتی

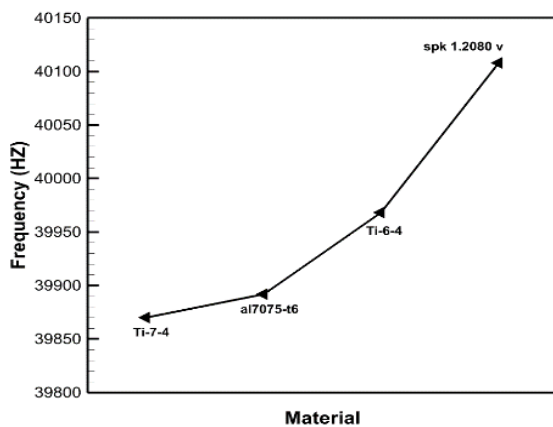
ماده مناسب در تجهیزات ارتعاشی فراصوتی به طور معمول آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم و فولاد است. در این میان آلیاژهای تیتانیوم به خاطر خواص استحکامی و صوتی عالی به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند [۱۴]. آلومینیوم عموماً فقط خواص صوتی عالی دارد و برای تیغه‌های تحت بارگذاری‌های زیاد در دامنه‌های بالا استفاده نمی‌شود [۱۵]. از مزایای آلیاژهای تیتانیوم نسبت به آلومینیوم و فولاد می‌توان به چگالی کم، مقاومت بالا، ساخت و شکل‌دهی راحت، مقاومت عالی در برابر خوردگی و نسبت استحکام به وزن بالا اشاره کرد. همچنین خواص مقاومتی بسیار خوب در برابر تشدید و خستگی

و سازگاری تیتانیوم با الزامات بهداشتی صنعت فراوری مواد غذایی را می‌توان نام برد [۱۶].

در **Error! Not a valid bookmark self-reference.**، خصوصیات مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزاء محدود برای چهار ماده شامل دو آلیاژ تیتانیوم Ti-7Al-4Mo و Ti-6Al-4V و آلیاژ فولاد SPK1.2080 و آلیاژ آلومینیوم Al7075-T6 ارائه شده است. در این بخش به بررسی و تأثیر پارامتر تغییر جنس ماده قطعه هورن برش فراصوتی بر فرکانس تشدید پرداخته می‌شود. براساس اطلاعات منابع و محدودیت‌های بازار (هزینه)، ماده مدنظر برای ساخت هورن آلیاژ Ti-6Al-4V به‌عنوان بهترین گزینه موجود در بازار انتخاب شده است.

جدول ۲. مشخصات مواد در تحلیل اجزاء محدود مودال در نرم افزار انسیس [۱۷ و ۱۸]

جنس	چگالی (g/cm^3)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
Ti-6Al-4V	۴/۴۳	۱۲۰	۰/۳۴
Ti-7Al-4Mo	۴/۴۸	۱۱۱	۰/۳۲
SPK 1.2080 v	۷/۶۷	۲۱۰	۰/۳۰
Al 7075-T6	۲/۸۱	۷۰	۰/۳۲



شکل ۲۲. نمودار تغییر فرکانس تشدید بر حسب جنس ماده تیغه برش فراصوتی

شکل ۲۲ نمودار تغییر فرکانس تشدید بر حسب جنس ماده را نمایش می‌دهد. براساس نتایج، تغییر جنس ماده به ترتیب از تیتانیوم Ti-7Al-4Mo به آلومینیوم Al7075-T6 به تیتانیوم Ti-6Al-4V و در نهایت به فولاد SPK1.2080v فرکانس تشدید مدنظر را افزایش می‌دهد. مقدار فرکانس تشدید از نظر جنس ماده به دو عامل مدول الاستیک و چگالی وابسته است. همان‌طور که از نمودار ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت مدول یانگ به چگالی، فرکانس تشدید قطعه حاصل نیز افزایش می‌یابد.

۵. نتایج تجربی

پس از انجام شبیه‌سازی‌های لازم نمونه هورن با فرکانس نزدیک به ۴۰ کیلوهرتز و یکنواختی دامنه مناسب ۹۳ درصد از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V ساخته شد. شکل ۲۳ نمونه هورن برشی فراصوتی ساخته شده از آلیاژ Ti-6Al-4V را نشان داده است.



شکل ۲۳. نمونه هورن برشی فراصوتی ساخته شده از جنس Ti-6Al-4V

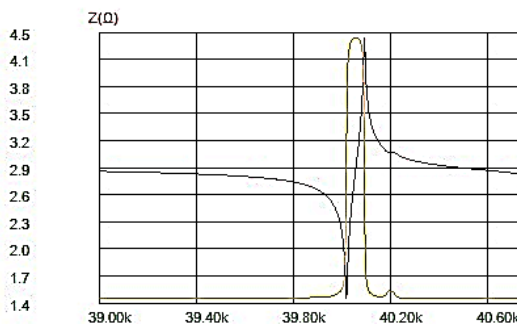
برای تعیین فرکانس تشدید هورن ارتعاشی بر روی ترنسدیوسر ۴۰ کیلوهرتز نصب گردید و توسط دستگاه تحلیل‌گر امپدانس نمودار امپدانس-فرکانس آن استخراج گردید. دستگاه تحلیل‌گر امپدانس، جریان الکتریکی ولتاژ پائینی در حدود ۱ ولت را در محدوده فرکانسی تعیین شده به ترنسدیوسر اعمال می‌کند و با دریافت نتایج جریان خروجی مقدار امپدانس اجزای متصل به خود را اندازه می‌گیرد.

فرکانس تشدید فرکانسی است که مقدار امپدانس سیستم حداقل مقدار خود را دارد. شکل ۲۴ چیدمان آزمون امپدانس شامل مجموعه ارتعاشی فراصوتی (ترنسدیوسر و هورن برشی)، دستگاه تحلیل‌گر امپدانس و نرم افزار مربوطه را نشان می‌دهد.



شکل ۲۴. چیدمان آزمون امپدانس مجموعه ترنسدیوسر و تیغه برشی فراصوتی ۴۰ کیلوهرتز

شکل ۲۵ نتیجه آزمون امپدانس یعنی نمودار امپدانس-فرکانس را نشان داده است. پس از موتناژ هورن بر روی ترنسدیوسر فراصوتی فرکانس تشدید برابر ۳۹۹۶۸ هرتز، توسط دستگاه تحلیل‌گر امپدانس نمودار امپدانس (برحسب اهم) نسبت به فرکانس خروجی (برحسب هرتز) دستگاه به دست آمد. فرکانس تشدید همان ناحیه فرکانسی با حداقل امپدانس است. مقایسه این فرکانس حاصل از آزمون تجربی با فرکانس تشدید حاصل از شبیه‌سازی، برابر ۳۹۹۶۸ هرتز، بیانگر تنها حدود ۰/۱ درصد خطا در شبیه‌سازی است.



شکل ۲۵. نتیجه آزمون امپدانس توسط دستگاه تحلیل‌گر امپدانس با فرکانس تشدید ۳۹۹۶۸ هرتز

از مهم‌ترین عوامل اختلاف بین فرکانس رزونانس در شبیه‌سازی اجزاء محدود و نتیجه آزمون امپدانس می‌توان اختلاف خصوصیات الاستیک مواد با مقادیر واقعی ماده خام، تolerانس‌های ابعادی و هندسی قطعه ساخته شده و اختلاف

خواص مواد تولید شده توسط منابع تامین کننده مختلف را یاد کرد.

۶. نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای ابعاد هورن برشی فراصوتی بر روی فرکانس تشدید حاصل هورن و یکنواختی دامنه جلوی هورن برش در نرم افزار تحلیل اجزاء محدود انسیس با استفاده از تحلیل مودال حاصل شده است. نتایج حاصل از پارامترها عبارتند از:

- افزایش ۱: ضخامت جانبی بالاترین قسمت تیغه برش فراصوتی، ۲: طول کلی تیغه برش فراصوتی، ۳: عرض شیارها، و ۴: طول شیارها، در محدوده تعیین شده، فرکانس تشدید تیغه برشی فراصوتی را کاهش می دهد.
- در عین حال افزایش ۱: موقعیت شیارها از بالای قطعه، ۲: موقعیت تغییر ضخامت از بالای قطعه، و ۳: نسبت ملول الاستیک به چگالی ماده، فرکانس تشدید تیغه برشی فراصوتی را افزایش می دهد.
- در عمل ابعاد نهایی طراحی براساس دو پارامتر مهم فرکانس تشدید حاصل و یکنواختی جلو دامنه حاصل

۸. مأخذ

می گردد. در برخی موارد به طور مجزا فرکانس به مقدار نامی نزدیک است اما یکنواختی دامنه مطلوب نیست. در برخی دیگر نیز برعکس ممکن است یکنواختی دامنه مناسب باشد منتها فرکانس حاصل از فرکانس نامی طراحی دور باشد. در عمل ابعاد نهایی براساس حالت با نزدیک تر به فرکانس تشدید و بیشترین یکنواختی دامنه تعیین می گردد.

- فرکانس تشدید مدل با ابعاد منتخب در شبیه سازی اجزاء محدود برابر ۳۹۹۶۸ هرتز شده است. درحالی که فرکانس تشدید نمونه ساخته شده به همراه ترنسدیوسر برابر ۴۰۰۱۸ هرتز شده که تنها ۰/۱ درصد خطا را نشان می دهد. این بیانگر دقت مناسب شبیه سازی اجزاء محدود تحلیل مودال در تعیین مشخصه های فرکانسی قطعات ارتعاشی در فناوری التراسونیک توان بالا است.

۷. تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از شرکت دانش بنیان فراصوت تجهیز ایرانیان به جهت همکاری و حمایت های خود در ساخت و آزمون امپدانس نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

- [1] Liu, Li, Wenyu Jia, Dezhong Xu, and Renjun Li. "Applications of ultrasonic cutting in food processing." *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, Vol.39, no.6, pp.1762-1769.
- [2] Yildiz, Gulcin, Sindy Palma, and Hao Feng. "Ultrasonic Cutting as a New Method to Produce Fresh-Cut Red Delicious and Golden Delicious Apples." *Journal of food science*, 2019, Vol.84, no.12, pp.3391-3398.
- [3] Rawson, F. F. "14 An introduction to ultrasonic food cutting." *Ultrasound in food processing*, 1998, p.254.
- [4] Bhargava, Nitya, Rahul S. Mor, Kshitiz Kumar, and Vijay Singh Sharanagat. "Advances in application of ultrasound in food processing: A review." *Ultrasonics sonochemistry*, 2021, Vol.70, p.105293.
- [5] <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-rubber-cutting-en-5182444.pdf> , visit at 2/24/2023.
- [6] ABEDINI, REZVAN, AMIR ABDULLAH, Yunes Alizadeh, and VAHID FARTASHVAND, "Effect of ultrasonic on hot compaction of AA100 and Ti-6Al-4V powders", 2016, pp.1-12.

- [7] Abedini, Rezvan, Amir Abdullah, Yunes Alizadeh, and Vahid Fartashvand, "A Roadmap for application of high-power ultrasonic vibrations in metal forming." *Modares Mechanical Engineering*, 2017, Vol.16, no.10, pp.323-334.
- [8] Abdullah, Amir, Mohammad Sotoodezadeh, Rezvan Abedini, and Vahid Fartashvand, "Experimental study on ultrasonic use in dry creep-feed up-grinding of aluminum 7075 and Steel X210Cr12." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, Vol.14, pp.191-198.
- [9] Abedini, Rezvan, "A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic in Plastic and Metal Welding." *Journal of Vibration and Sound*, 2022, Vol.10, no.20, pp.35-55.
- [10] Abedini, Rezvan, and Mohammad Saber Jahromi, "A review of applications of high power ultrasound technology in medical surgery." *Journal of Vibration and Sound*, 2022, Vol.10, no.20, pp.157-173.
- [11] Afshari, Mehran, and Behrooz Arezoo, "Optimal design and experimental validation of ultrasonic wide blade horn." *Applied Acoustics*, 2021, Vol.182, p.108254.
- [12] Ensminger, Dale, and Foster B. Stulen, eds., "Ultrasonics: data, equations and their practical uses." CRC press, 2008.
- [13] <https://www.atcp-ndt.com/images/TRZ/Flyer-TRZ-EN.pdf>, visit at 2/24/2023.
- [14] "Vibration Analysis for Developing Ultrasonic Kitchen Knife for Cutting Foods." *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2021, Vol.38, no.6, pp.447-454.
- [15] <https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-ultrasonic-horn-branson-en-us-160126.pdf>, visit at 2/24/2023.
- [16] https://www.ultrasonic-resonators.org/misc/references/articles/Branson_Ultrasonics_'Technolog_TL-18_The_Advantages_of_7-4_over_6-4_Titanium_for_Ultrasonic_Tooling'.pdf, visit at 2/24/2023.
- [17] <https://asm.matweb.com> Last visit: 2022/02/25.
- [18] Donachie, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. ASM international, 2000.

پی نوشت:

1. Wide blade-type horns
2. Large-area block-type horns
3. Features
4. Transducer
5. Booster
6. Cutting tool/horn
7. Generator (power supply)
8. Converter (transducer)
9. Ansys Workbench
10. Solidworks
11. Amplitude uniformity