

سلامی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

بررسی تشکیل لبه انباشته در سوراخکاری ارتعاشی آلومینیوم 2024-T6

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک ساخت و تولید

علیرضا بارانی

اساتید راهنما

دکتر علیرضا فدائی تهرانی

دکتر ناصر نهضت

سپاس‌گزاری

خداوند متعال را به خاطر توفیق تحصیل علم و دانش سپاس‌گزارم. همین‌طور از حمایت‌ها و فداکاری‌های بی‌دریغ پدر، مادر و خواهران عزیزم شکر فراوان دارم.

برای پدیدآورنده افتخار بزرگی بود که زیر نظر و راهنمایی اساتید گرامی جناب آقایان دکتر علیرضا فدائی تهرانی و دکتر ناصر نهضت و مشاوره آقای دکتر سعید امینی این تحقیق را به انجام رساند. بدین وسیله از زحمات ایشان قدردانی و شکر می‌نمایم. همچنین از دوست عزیزم جناب آقای مهندس حسین پاک‌طینت که در انجام این تحقیق به این جانب یاری رساند، سپاس‌گزارم. همین‌طور از جناب آقای سعادت کاظمی که در ساخت تجهیزات مورد نیاز برای انجام این تحقیق، همکاری نمودند، صمیمانه شکر می‌نمایم.

علیرضا بارانی

اسفند ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقدیم بہ

رہنویان علم و دانش
پتہ

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
ده	فهرست شکل ها
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
۴	۱-۱ تاریخچه اولتراسونیک
۱۰	۲-۱ هدف از تحقیق
۱۰	۳-۱ چیدمان پایان نامه
	فصل دوم: ارتعاشات اولتراسونیک و تاثیر آنها بر اصطکاک
۱۱	۱-۲ امواج اولتراسونیک
۱۳	۲-۲ طول موج
۱۴	۳-۲ امپدانس صوتی
۱۵	۴-۲ میرایی امواج صوتی در مواد جامد [۴۸]
۱۵	۵-۲ اجزای کله گی ارتعاشی
۱۶	۶-۲ تولید ارتعاشات اولتراسونیک توان بالا
۱۹	۷-۲ ماشینکاری ارتعاشی
۲۱	۱-۷-۲ ماشینکاری ارتعاشی یک بعدی [۶۰]
۲۴	۲-۷-۲ ماشینکاری ارتعاشی دوبعدی [۶۰]
۲۵	۳-۷-۲ سینماتیک سوراخکاری ارتعاشی
۲۷	۸-۲ انواع فرآیندهای ماشینکاری ارتعاشی

۲۸..... ۹-۲ روند تشکیل لبه انباشته

۲۹..... ۱۰-۲ تاثیر ارتعاشات اولتراسونیک روی اصطکاک خشک

فصل سوم: ابزار ارتعاشی

۳۵..... ۱-۳ هورن

۳۵..... ۲-۳ روش‌های طراحی هورن

۳۶..... ۳-۳ مقایسه نتایج روش‌های اجزا محدود و تحلیلی در طراحی هورن

۳۷..... ۴-۳ تاثیر مته بر رفتار ارتعاشی

۴۴..... ۵-۳ طراحی ابزار ارتعاشی

۴۶..... ۱-۵-۳ اصول طراحی ابزار ارتعاشی

۵۴..... ۶-۳ طراحی ابزار سوراخکاری ارتعاشی چرخشی

۵۴..... ۱-۶-۳ طراحی ابزار ارتعاشی اولیه

۶۴..... ۲-۶-۳ طراحی ابزار ارتعاشی نهایی

فصل چهارم: آزمایش‌ها و نتایج

۷۰..... ۱-۴ روش آزمایش

۷۳..... ۱-۱-۴ وسایل آزمایش

۷۵..... ۲-۴ نتایج

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۹۶..... ۱-۵ نتیجه‌گیری

۱۰۰..... ۲-۵ پیشنهادها

۱۰۱..... مراجع

فهرست شکل‌ها

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۱: تصویر شماتیک از فرآیند سوراخکاری ارتعاشی [۸]	۴
شکل ۱-۲: امواج طولی و عرضی [۴۵]	۱۲
شکل ۲-۲: نیم‌موج ایستا درون یک استوانه	۱۳
شکل ۳-۲: اجزای کله‌گی ارتعاشی	۱۶
شکل ۴-۲: ترانسدیوسر مگنتوستریکتیو [۵۲]	۱۷
شکل ۵-۲: ترانسدیوسر پیزوالکتریک [۵۸]	۱۸
شکل ۶-۲: اصول ماشینکاری اولتراسونیک [۵۹]	۱۹
شکل ۷-۲: سیستم مختصات [۶۰]	۲۰
شکل ۸-۲: تماس براده با ابزار در ماشینکاری ارتعاشی یک‌بعدی [۶۱]	۲۱
شکل ۹-۲: مسیر حرکت ابزار در ماشینکاری ارتعاشی یک‌بعدی [۶۱]	۲۲
شکل ۱۰-۲: ماشینکاری ارتعاشی یک‌بعدی [۶۰]	۲۲
شکل ۱۱-۲: نمودار سیکل کاری برای ماشینکاری ارتعاشی یک‌بعدی [۶۰]	۲۴
شکل ۱۲-۲: مسیر حرکت ابزار در ماشینکاری ارتعاشی دو‌بعدی [۶۰]	۲۵
شکل ۱۳-۲: زاویه چرخش مته [۶]	۲۶
شکل ۱۴-۲: سیر تکامل سایش سطح آزاد V_{BB} تابعی از زمان ماشینکاری برای سرعت‌های برش مختلف [۶۴]	۲۸
شکل ۱۵-۲: مدل سیستم ارتعاشی با اصطکاک خشک [۶۵]	۳۰
شکل ۱۶-۲: راستای ارتعاش و راستای حرکت در فرآیند تراشکاری [۶۵]	۳۱
شکل ۱۷-۲: رابطه بین نیروی اصطکاک و سرعت [۶۵]	۳۲
شکل ۱۸-۲: رابطه بین نیروی استاتیک با نسبت سرعت [۶۵]	۳۲
شکل ۱۹-۲: ناحیه تماس بین براده و ابزار [۷]	۳۳

- شکل ۳-۱: تصویر شماتیک از اجزای یک سیستم اولتراسونیک. (a) سیستم اولتراسونیک (b) جایگزینی محل‌های اتصال با نیروهای معادل [۶۵]. ۳۸
- شکل ۳-۲: یک هادی امواج اولتراسونیک [۶۵]. ۴۱
- شکل ۳-۳: مود پیچشی [۵۲]. ۴۴
- شکل ۳-۴: مود خمشی [۵۲]. ۴۵
- شکل ۳-۵: مود طولی [۵۲]. ۴۵
- شکل ۳-۶: ایجاد شیار در هورن [۶۸]. ۴۶
- شکل ۳-۷: ایجاد شیار طولی و عرضی در هورن به منظور جلوگیری از فعال شدن مودهای غیر طولی هم‌زمان با تحریک مود طولی [۶۹]. ۴۷
- شکل ۳-۸: چهار شکل هورن ساده [۳۳]. ۴۸
- شکل ۳-۹: هورن تاخورده [۳۵]. ۴۹
- شکل ۳-۱۰: هورن با شیارهای غیرمستقیم [۷۳]. ۴۹
- شکل ۳-۱۱: تصاویر دو هورن ترکیبی [۶۸، ۷۴]. ۴۹
- شکل ۳-۱۲: ضریب تقویت هورن‌های مختلف: (a) نمایی، (b) مخروطی و (c) کنتویدال [۷۲]. ۵۰
- شکل ۳-۱۳: رابطه بین کاهش قطر انتهای هورن با افزایش دامنه [۷۵]. ۵۱
- شکل ۳-۱۴: توزیع تنش و سرعت ارتعاش در هورن‌های مختلف: (a) پله‌ای، (b) مخروطی، (c) نمایی، (d) شانه‌ای و (e) فوریه [۹]. ۵۲
- شکل ۳-۱۵: روش‌های مختلف گیره‌بندی هورن اولتراسونیک [۳۱]. ۵۳
- شکل ۳-۱۶: ترانسدیوسر اولتراسونیک [۵۸]. ۵۵
- شکل ۳-۱۷: ژنراتور اولتراسونیک ۵۵
- شکل ۳-۱۸: مود طولی بوستر ۵۶
- شکل ۳-۱۹: مدل سه بعدی ابزار ارتعاشی ۵۷
- شکل ۳-۲۰: ابزار مش بندی شده ۵۸
- شکل ۳-۲۱: المان SOLID92 [۸۲]. ۵۸

- شکل ۳-۲۲: مود طولی ابزار ارتعاشی ۵۹
- شکل ۳-۲۳: نقاط گره و شکم ۶۰
- شکل ۳-۲۴: ابزار ارتعاشی اولیه ۶۰
- شکل ۳-۲۵: بسامد تشدید طولی ابزار ارتعاشی ۶۱
- شکل ۳-۲۶: دستگاه تراش انیورسال مدل AJAX-AJ 725 ۶۱
- شکل ۳-۲۷: مکانیزم برق‌رسانی ۶۲
- شکل ۳-۲۸: سیستم سوراخکاری ارتعاشی چرخشی با ابزار اولیه ۶۲
- شکل ۳-۲۹: نمودار دینامومتر برای نیرو: سرعت برشی ۹۵rev/min، پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev و دامنه ارتعاش ۸ میکرون ۶۳
- شکل ۳-۳۰: مود طولی بوستر ۶۴
- شکل ۳-۳۱: هورن با یک عدد پیچ مغزی ۶۵
- شکل ۳-۳۲: شکست هورن در محل پیچ مغزی ۶۵
- شکل ۳-۳۳: هورن با دو عدد پیچ مغزی ۶۶
- شکل ۳-۳۴: مته شکسته شده در اثر موج خمشی ۶۶
- شکل ۳-۳۵: ابزار ارتعاشی با سیستم گیره‌بندی کولت و فشنگی ۶۷
- شکل ۳-۳۶: فشنگی شکسته شده ۶۷
- شکل ۳-۳۷: مود طولی ابزار ارتعاشی ۶۸
- شکل ۳-۳۸: نقاط گره و شکم موج ۶۸
- شکل ۳-۳۹: ابزار ارتعاشی نهایی ۶۹
- شکل ۳-۴۰: نمودار اسکن ابزار ارتعاشی نهایی ۶۹
- شکل ۳-۴۱: برخی از هورن‌های مورد استفاده ۶۹
- شکل ۴-۱: سیستم سوراخکاری مورد استفاده ۷۱
- شکل ۴-۲: روش اندازه‌گیری دامنه ارتعاش ۷۲
- شکل ۴-۳: وسایل مورد استفاده در آزمایش‌ها ۷۴

- شکل ۴-۴: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۴۶۰rpm و دامنه صفر) ۷۵
- شکل ۴-۵: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۴۶۰rpm و دامنه ۱٪) ۷۵
- شکل ۴-۶: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۴۶۰rpm و دامنه ۵٪) ۷۶
- شکل ۴-۷: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۷۵۵rpm و دامنه صفر) ۷۶
- شکل ۴-۸: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۷۵۵rpm و دامنه ۱٪) ۷۷
- شکل ۴-۹: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۷۵۵rpm و دامنه ۵٪) ۷۷
- شکل ۴-۱۰: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۱۲۵۵rpm و دامنه صفر) ۷۷
- شکل ۴-۱۱: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۱۲۵۵rpm و دامنه ۱٪) ۷۸
- شکل ۴-۱۲: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۱۲۵۵rpm و دامنه ۵٪) ۷۸
- شکل ۴-۱۳: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev و دامنه صفر) ۷۹
- شکل ۴-۱۴: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev و دامنه ۱٪) ۷۹
- شکل ۴-۱۵: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev و دامنه ۵٪) ۸۰
- شکل ۴-۱۶: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۲۰۸mm/rev و دامنه صفر) ۸۰
- شکل ۴-۱۷: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۲۰۸mm/rev و دامنه ۱٪) ۸۰
- شکل ۴-۱۸: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۲۰۸mm/rev و دامنه ۵٪) ۸۱
- شکل ۴-۱۹: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۳۴۸mm/rev و دامنه صفر) ۸۱
- شکل ۴-۲۰: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۳۴۸mm/rev و دامنه ۱٪) ۸۲
- شکل ۴-۲۱: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (پیشروی ۰/۳۴۸mm/rev و دامنه ۵٪) ۸۲
- شکل ۴-۲۲: شکست براده‌ها با افزایش سرعت دورانی: (الف) ۷۵۵rpm، ۰/۳۴۸mm/rev، دامنه صفر (ب) ۱۲۵۵rpm، ۰/۳۴۸mm/rev، دامنه صفر ۸۳
- شکل ۴-۲۳: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۴۶۰rpm و پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev) ۸۳
- شکل ۴-۲۴: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۴۶۰rpm و پیشروی ۰/۲۰۸mm/rev) ۸۴
- شکل ۴-۲۵: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۴۶۰rpm و پیشروی ۰/۳۴۸mm/rev) ۸۴
- شکل ۴-۲۶: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۷۵۵rpm و پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev) ۸۴

- شکل ۴-۲۷: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۷۵۵rpm و پیشروی ۰/۲۰۸mm/rev) ۸۵
- شکل ۴-۲۸: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۷۵۵rpm و پیشروی ۰/۳۴۸mm/rev) ۸۵
- شکل ۴-۲۹: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۱۲۵۵rpm و پیشروی ۰/۱۰۴mm/rev) ۸۵
- شکل ۴-۳۰: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۱۲۵۵rpm و پیشروی ۰/۲۰۸mm/rev) ۸۶
- شکل ۴-۳۱: نیروی محوری نسبت به شماره سوراخ (سرعت دورانی ۱۲۵۵rpm و پیشروی ۰/۳۴۸mm/rev) ۸۶
- شکل ۴-۳۲: تصاویر میکروسکوپ نوری برای شرایط مختلف ۸۸
- شکل ۴-۳۳: تصاویر میکروسکوپ نوری برای شرایط مختلف ۸۹
- شکل ۴-۳۴: تصاویر میکروسکوپ نوری برای شرایط مختلف ۹۰
- شکل ۴-۳۵: تغییرات زبری سطح سوراخ نسبت به پیشروی ۹۱
- شکل ۴-۳۶: شکل براده. (الف) ۴۶۰rpm، ۰/۱۰۴mm/rev، دامنه صفر (ب) ۴۶۰rpm، ۰/۱۰۴mm/rev و دامنه ۵٪ ۹۱
- شکل ۴-۳۷: صافی سطح سوراخ: (الف) ۷۵۵rpm، ۰/۲۰۸mm/rev، دامنه صفر (ب) ۷۵۵rpm، ۰/۲۰۸mm/rev، دامنه ۱٪ ۹۲
- شکل ۴-۳۸: شکست براده‌ها با افزایش پیشروی: (الف) ۷۵۵rpm، ۰/۱۰۴mm/rev، دامنه صفر (ب) ۷۵۵rpm، ۰/۳۴۸mm/rev، دامنه صفر ۹۲
- شکل ۴-۳۹: شکست براده‌ها با افزایش سرعت دورانی: (الف) ۷۵۵rpm، ۰/۳۴۸mm/rev، دامنه صفر و (ب) ۱۲۵۵rpm، ۰/۳۴۸mm/rev، دامنه صفر ۹۳
- شکل ۴-۴۰: چسبندگی به سطح سوراخ: (الف) ۷۵۵rpm، ۰/۱۰۴mm/rev، دامنه صفر (ب) ۷۵۵rpm، ۰/۱۰۴mm/rev و دامنه ۵٪ ۹۳
- شکل ۴-۴۱: گیر افتادن براده‌ها در شیارهای مته: (الف) ۴۶۰rpm، ۰/۲۰۸rev/mm، دامنه صفر (ب) ۴۶۰rpm، ۰/۲۰۸rev/mm، دامنه ۵٪ ۹۴
- شکل ۴-۴۲: تغییر شکل براده‌ها با افزایش تعداد سوراخ تولیدی: (الف) و (ب) به ترتیب اولین و دهمین سوراخ. ۷۵۵rpm، ۰/۱۰۴mm/rev، دامنه صفر (ج) و (د) اولین و دهمین سوراخ تولیدی. ۷۵۵rpm، ۰/۱۰۴mm/rev، دامنه ۱٪ ۹۴
- شکل ۴-۴۳: تغییر کیفیت سطح براده در اثر حرکت روی لبه انباشته: (الف) براده اولین سوراخ. (ب) براده دهمین سوراخ. ۱۲۵۵rpm، ۰/۳۴۸mm/rev و دامنه ۵٪ ۹۵

چکیده

سوراخکاری یکی از فرآیندهای تولید قطعات است که سهم بسزایی در صنعت ماشینکاری دارد. گفته شده که این فرآیند حدود ۴۰٪ از کل فرآیندهای ماشینکاری را به خود اختصاص داده است. بنابراین تاثیر این فرآیند در هزینه تمام شده قطعات مهم است. جدای از هزینه‌های مصرفی برای انجام فرآیند سوراخکاری، انجام عملیات تکمیلی مانند برق‌کاری به منظور دستیابی به دقت ابعادی مناسب نیز موجب افزایش قیمت تمام شده می‌شود. به منظور کاهش هزینه‌ها در فرآیند سوراخکاری، نظر محققان به سمت بهبود و یا استفاده از روش‌های جدید سوراخکاری معطوف گردیده است. یکی از روش‌های جدید که در سال‌های اخیر مطرح شده است، سوراخکاری به کمک ارتعاشات می‌باشد که به نام سوراخکاری ارتعاشی در این پایان‌نامه خوانده می‌شود. این روش که یک فرآیند سوراخکاری ترکیبی است، از افزودن یک حرکت ارتعاشی هارمونیک به فرآیند سوراخکاری معمولی حاصل می‌شود. همان‌طور که گفته شد کاهش هزینه یکی از اهداف حرکت به سمت استفاده از روش سوراخکاری ارتعاشی می‌باشد. بخشی از این هزینه مربوط به ابزار می‌شود. یکی از عوامل آسیب به ابزار، تشکیل لبه انباشته می‌باشد که هنگام جدا شدن موجب جدایی لایه‌ای از سطح ابزار می‌شود. بنابراین مطالعه و کاهش احتمال تشکیل لبه انباشته می‌تواند به اقتصاد ماشینکاری کمک کند. بدین منظور ابتدا یک ابزار ارتعاشی اولیه با توجه به تمامی اصول مورد نیاز، طراحی و ساخته شد. سپس بسامد تشدید طولی این ابزار به طور عملی بدست آمد و با بسامد تشدید طولی حاصل از طراحی مقایسه شد. از مقایسه نتایج، عوامل ایجاد خطا بین طراحی و عمل مشخص گردید. سپس این ابزار ارتعاشی با استفاده از یک مکانیزم چرخشی روی دستگاه تراش برای انجام آزمایش‌های اولیه به منظور بررسی صحت کاری مجموعه فرآیند سوراخکاری ارتعاشی آماده شده، نصب گردید. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های اولیه حاکی از کاهش نیرو در استفاده از فرآیند سوراخکاری ارتعاشی بود. پس از اطمینان از درستی کارکرد سیستم سوراخکاری ارتعاشی آماده شده، ابزار ارتعاشی نهایی (با استفاده از تجارب کسب شده از طراحی و ساخت ابزار ارتعاشی اولیه) برای انجام آزمایش‌های نهایی به منظور مطالعه تشکیل لبه انباشته و نیز مقایسه صافی سطح سوراخ‌های ایجادشده با استفاده از دو فرآیند سوراخکاری در شرایط ماشینکاری متفاوت روی قطعه کار از جنس آلومینیوم 2024-T6، طراحی و ساخته شد. دلیل اصلی انتخاب قطعه کار آلومینیومی تقاضای روز افزون صنایع برای استفاده از آلومینیوم به منظور سبک‌سازی قطعات می‌باشد. به طور کلی نتایج بدست آمده از انجام این تحقیق بیان‌گر کاهش در تشکیل لبه انباشته و افزایش صافی سطح در استفاده از فرآیند سوراخکاری ارتعاشی نسبت به فرآیند سوراخکاری معمولی می‌باشد.

کلمات کلیدی: سوراخکاری، سوراخکاری ارتعاشی، اولتراسونیک، لبه انباشته، آلومینیوم 2024-T6

فصل اول

مقدمه

فرآیندهای ماشینکاری از بنیادی‌ترین فرآیندها در صنایع ساخت و تولید هستند. هر لحظه مقادیر زیادی براده حاصل از انجام این گونه فرآیندها در دنیا تولید می‌شود. تولید در زمان کمتر و با کیفیت بیشتر اهدافی هستند که هر تولیدکننده‌ای برای دستیابی به آنها تلاش می‌کند تا در بازار امروزی بتواند رقابت کرده و باقی بماند.

یکی از موارد مهم که در افزایش زمان ماشینکاری و کاهش کیفیت قطعات موثر است، آسیب ابزار براده‌برداری می‌باشد. آسیب زود هنگام ابزار می‌تواند موجب توقف‌های ناگهانی و غیر منتظره در روند ماشینکاری شده و زمان تولید و بدنبال آن هزینه تمام‌شده قطعات را افزایش دهد. عمر ابزار ناکافی ممکن است باعث تعویض‌های مکرر ابزار و توقف ماشین‌ابزار شود. ابزار آسیب دیده به هر حال نیازمند تعویض یا تیزکردن مجدد است که برای این کار نیاز به نیرو و زمان کاری می‌باشد. کاهش تعداد تعویض‌های ابزار در واحد زمان و استفاده از ابزارهای ارزان‌تر برای ماشینکاری قطعات سخت‌تر، مواردی هستند که بسیار در قیمت تمام‌شده قطعه کار موثرند [۱].

از بین فرآیندهای ماشینکاری، سوراخکاری حدود ۴۰٪ را تشکیل می‌دهد [۲] که سهم نسبتاً زیادی می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که قسمت زیادی از هزینه‌های ماشینکاری در دنیا به فرآیندهای سوراخکاری اختصاص دارد. یکی از موارد موثر در هزینه سوراخکاری، هزینه مته مورد استفاده می‌باشد که اگر بتوان عمر آن را افزود، یعنی تعداد سوراخ تولیدی با کیفیت را به ازای یک مته افزایش داد می‌توان هزینه‌های تولید را کاهش داد.

سوراخکاری آلومینیوم امروزه از اهمیت بیشتری برخوردار است. استفاده از آلیاژهای این ماده در صنایع هوا و فضا از گذشته مورد نظر بوده است. اما در سال‌های اخیر به منظور سبک‌سازی قطعات، کاربرد آلیاژهای آلومینیوم در

صنایع به خصوص خودروسازی رو به افزایش می‌باشد [۳]. این نیاز روز افزون به قطعات از جنس آلیاژهای آلومینیوم، تقاضا برای ماشینکاری با هزینه کمتر و کیفیت بهتر این مواد را افزایش داده است.

تدابیر مختلفی برای افزایش عمر مته‌ها به کار برده شده است. یکی از این تدابیر پوشش‌دهی می‌باشد که در سالهای اخیر با توسعه روش‌های پوشش‌دهی، تولیدکننده‌های ابزارهای برشی توانسته‌اند پوشش‌های با مقاومت بالا را روی زیر لایه‌های مختلف رسوب دهند. استفاده از روانکارها در سوراخکاری روشی دیگر برای افزایش عمر ابزار می‌باشد که دارای سه مشکل هستند: (۱) هزینه ماشینکاری را افزایش می‌دهد که گفته شده حدود ۲۰٪ از این هزینه را روانکار تشکیل می‌دهد [۴]، (۲) باعث آسیب‌های زیست محیطی می‌شود [۵] و (۳) در سرعت‌های بالا بدلیل عدم نفوذ به محل برش تاثیری بر فرآیند ندارند. راه دیگر برای افزایش عمر ابزار در سوراخکاری، تولید مته‌های با هندسه خاص می‌باشد که این طراحی مخصوص قابلیت خروج بهتر براده‌ها و کاهش نیروی سوراخکاری را فراهم می‌کند اما استفاده از این مته‌های خاص موجب افزایش هزینه سوراخکاری می‌شود [۶].

برای حذف تاثیرهای منفی روانکارها، کاربرد روش‌های سوراخکاری خشک بیشتر مورد توجه است. مشکلات اصلی در سوراخکاری خشک آلومینیوم چسبندگی براده به ابزار و گیرکردن براده در شیارهای مته هستند. این مشکلات، مربوط به فرآیند تشکیل براده و حرکت براده درون شیار مته می‌باشد بنابراین فرآیند تشکیل براده و حرکت آن در شیارهای مته نکات کلیدی در بررسی سوراخکاری خشک آلومینیوم هستند [۵].

یکی از روش‌های خوب و جدید برای بهبود فرآیندهای ماشینکاری از جمله فرآیند سوراخکاری، استفاده از کمک امواج آکوستیک یا صوتی در این فرآیندها می‌باشد، که به آن سوراخکاری ارتعاشی^۱ گفته می‌شود. شکل ۱-۱ فرآیند سوراخکاری ارتعاشی را به طور شماتیک نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این فرآیند یک حرکت ارتعاشی (به قطعه کار) در راستای محور مته به فرآیند سوراخکاری معمولی افزوده می‌شود.

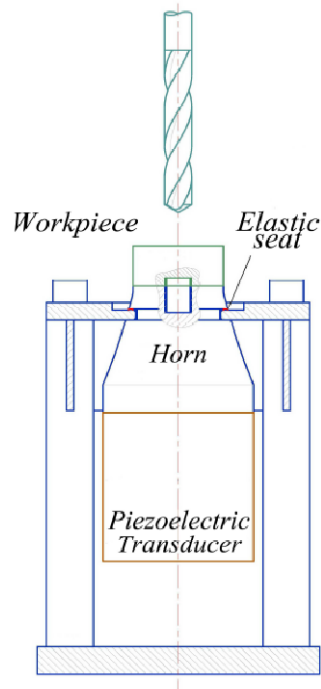
به طور کلی مزایایی در استفاده از امواج اولتراسونیک در فرآیندهای ماشینکاری گفته شده است که عبارتند از

[۷]:

- ۱- کاهش نیروی برش
- ۲- بهبود کیفیت سطح ماشینکاری شده
- ۳- افزایش عمر ابزار
- ۴- کاهش دمای ماشینکاری
- ۵- بهبود در شکست براده

۶- کاهش در مقدار کارسختی ماده در حال برش

۷- افزایش در کارایی سیال برش



شکل ۱-۱: تصویر شماتیک از فرآیند سوراخکاری ارتعاشی [۸]

۱-۱ تاریخچه اولتراسونیک

ارتعاشات اولتراسونیک، ابتدا در حدود اوایل قرن ۱۹ توسط رودولف کوئینگ تولید شد. او که از پیشگامان تحقیقات در آکوستیک بود، تلاش فراوانی برای کشف بالاترین بسامد قابل شنیدن توسط انسان کرد. برای دستیابی بدین هدف، وی ابزارهای مختلفی چون تیرهای فولادی، لوله‌های ارگ و دیپازون ساخت، که ارتعاشاتی با بسامد ۴۰۹۶ تا ۹۰۰۰۰ هرتز در هوا تولید می‌کردند [۹].

پدیده مهم پیزوالکتریک^۱ توسط برادران کوری در سال ۱۸۸۰ کشف شد. آن‌ها گزارش دادند که در صورت برش ورقه‌های نازکی از بعضی کریستال‌ها به شکل خاصی و اعمال فشار مکانیکی به آن‌ها، یک پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌شود. یک سال بعد از برادران کوری، لیپمن پدیده معکوس پیزوالکتریک را معرفی نمود. این پدیده به مفهوم آن است که با اعمال پتانسیل الکتریکی به کریستال‌های مزبور، آن‌ها تغییر شکل الاستیک می‌دهند. او همچنین نشان داد که با اعمال ولتاژ متناوب و متناسب به این کریستال‌ها می‌توان آن‌ها را به نوسان در آورد و یا برعکس با

نوسان کریستال‌ها می‌توان سیگنال‌های الکتریکی متناسب دریافت نمود. گالتن در سال ۱۸۳۳، صوتی ساخت که بسامد صدای آن به طور پیوسته از محدوده قابل شنیدن برای انسان تا محدوده‌های اولتراسونیک قابل تغییر بود. بیشترین بسامد قابل تولید در این سوت، ۲۵kHz بود [۱۰]. در سال ۱۹۰۷، آلتبرگ در زمینه تولید امواج اولتراسونیک در هوا و کشف و اندازه‌گیری آن فعالیت‌هایی انجام داد. در سال ۱۹۱۲، با رخداد فاجعه غرق شدن کشتی تایتانیک در اثر برخورد با کوه یخی، دانشمندان به دنبال روشی برای شناسایی و تشخیص کوه‌های یخی از فواصل دور، تحقیقاتی را در این زمینه آغاز کردند [۱۱].

اولین بار و در جریان جنگ جهانی اول، دانشمندان به اولتراسونیک به دید یک فن یا تکنولوژی نگاه کردند. در آن زمان و در شهر تولون فرانسه دانشمندی به نام لانگوین به دنبال راهی برای مقابله با زیردریایی‌های آلمانی بود. او موفق به طراحی و ساخت ژنراتور اولتراسونیک توان بالایی با استفاده از کریستال‌های کوارتز شد. او با استفاده از این ژنراتور، امواج اولتراسونیک را به آب منتقل کرد که نتیجه آن کشته شدن ماهی‌های کوچک موجود در نزدیکی منبع موج بود. این موفقیت به خاطر اثر پیزوالکتریکی موجود در کریستال‌های کوارتز بود که تا آن زمان هیچ استفاده عملی از آن‌ها نشده بود. لانگوین همچنین به منظور دستیابی به آکوستیک با توان بالا تکنیک‌های مختلفی در توسعه پیزوالکتریک، مورد آزمایش قرار داد. مرتعش کردن کوارتز در بسامد تشدید آن و چسباندن یک صفحه فلزی ضخیم در جلو و عقب کوارتز (ایجاد ساختار ساندویچی) از جمله آزمایش‌های وی در آن زمان بودند [۱۲]. در سال ۱۹۲۷، لومیس و وود به ایده استفاده از امواج بسامد بالای صوتی (حدود ۷۰kHz) در ماشینکاری توجه نمودند [۹].

برای اولین بار در سال ۱۹۲۹، سوکلو امواج اولتراسونیک تولید شده توسط کریستال‌های کوارتز را به منظور عیب‌یابی فلزات به کار برد [۱۱].

اولین اختراع در استفاده از امواج صوتی بسامد بالا در ماشینکاری در سال ۱۹۴۵ توسط بالاموث ثبت شد. او هنگام سنگ‌زنی اولتراسونیک با پودرهای ساینده کشف کرد که هنگام ارتعاش اولتراسونیک سر یک مبدل انرژی الکتریکی نزدیک ظرف نگهدارنده گل ساینده، سطح ظرف تجزیه می‌شود و شکل محل تجزیه شده، حفره‌ای دقیقاً هم‌شکل سر مبدل انرژی الکتریکی است. این کشف، تاثیر شگرفی در صنعت گذاشت و در اوایل دهه ۱۹۵۰ تولید ماشین‌ابزارهای اولتراسونیک آغاز گشت [۱۱].

فرآیند ترکیب امواج اولتراسونیک با ماشین‌ابزارهای معمولی توسط کومابه در حدود سال ۱۹۵۸ شروع شد. او نشان داد که نیروی برشی پالسی مزایای بسیاری مانند کاهش نیروی برشی، جابجایی گرمای برش و افزایش عمر ابزار را به دنبال دارد. او و همکارانش علاوه بر انجام عملیات برش به کمک ارتعاشات اولتراسونیک برای فلزات مختلف مثل فولاد کربنی، چدن، فولاد زنگ‌نزن و فولاد سخت‌شده، عملیات پرداخت نهایی و دنده‌زنی داخلی را نیز با این روش انجام دادند [۱۳].

ورونین و مارکوو در سال ۱۹۶۰ و سال بعد از آن ایساو و آنوخین با اعمال امواج اولتراسونیک به ابزار دستگاه تراش و انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که نیروی برش در این روش کاهش می‌یابد که دلیل آن یا کاهش اصطکاک میان ابزار و قطعه کار و یا کاهش موضعی استحکام مکانیکی ماده قطعه کار بود. اسکلتون در سال ۱۹۶۹ نشان داد که امواج اولتراسونیک روی استحکام ماده بی‌تاثیر است [۱۴].

برای اولین بار و در سال ۱۹۶۰، ماشینکاری گردشی به کمک امواج اولتراسونیک^۱ بررسی شد و در سال ۱۹۶۴ توسط لگ به عنوان اختراع ثبت شد [۱۵]. RUM ترکیبی از مکانیزم فرآیند ماشینکاری اولتراسونیک و فرآیند سنگ الماس معمولی است [۱۶]. پی و همکارانش در سال ۱۹۹۳ این فرآیند را برای کف‌تراشی گسترش دادند که به نتیجه مناسبی در نرخ براده‌برداری نرسیدند. آن‌ها در سال ۱۹۹۹ بر اساس بررسی دیگری روی کف‌تراشی به کمک امواج اولتراسونیک، شرایط رسیدن به نرخ براده‌برداری بالاتر در این روش را به دست آوردند [۱۵]. کف‌تراشی با ابزار معمول کف‌تراش با فرآیند فرزکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک، در سال ۲۰۰۷ توسط سو و همکارانش انجام گرفت. آن‌ها فیکسچر و قطعه کار را با سه ترانسدیوسر ارتعاش دادند و ابزار مناسب این روش را به منظور ماشینکاری سوپرآلیاژ پایه نیکل بدست آوردند [۱۷].

در سال ۱۹۹۱، تاکیاما فرآیند اعمال ارتعاش اولتراسونیک به قطعه کار را در فرآیند سوراخکاری معمولی بررسی نمود. چنگ و بون نشان دادند که کاهش اندازه پلیسه در سوراخکاری آلومینیوم با روش سوراخکاری ارتعاشی امکان‌پذیر است [۱۸]. نوجایر و ستول از طریق آزمایش نشان دادند که در سوراخکاری ارتعاشی آلیاژهای آلومینیوم، نیرو و گشتاور ۳۰-۵۰ درصد کاهش می‌یابد [۱۹].

ژانگ ثابت کرد که کاربرد ارتعاش با بسامد ۱۶kHz روی قطعه، اثرات افزایش صلیبیت سوراخکاری، کاهش لغزش مته و کاهش خطاهای اندازه سوراخ و افزایش عمر مته را دارد [۲۰]. ژانگ و وانگ با تحلیل مسیر براده در سوراخکاری ارتعاشی روی مواد چقرمه و نرم، یک روش جدید برای شکستن براده با کمک اولتراسونیک را پیشنهاد کردند [۲۱].

اکبری و آذرهوشنگ روش سوراخکاری اینکونل ۷۳۸ را در موارد گردی و استوانه‌ای بودن، زبری سطوح و بیش از اندازه بودن سوراخ ایجادشده با و بدون کمک اولتراسونیک بررسی و مقایسه کردند. در این کار که از مته‌های از جنس کاربید و با پوشش‌های TiN و TiAlN استفاده شده بود، مشخص شد که افزودن ارتعاشات اولتراسونیک به فرآیند سوراخکاری معمولی کیفیت سوراخ را بیش از ۶۰ درصد بهبود می‌بخشد. در آزمایش‌های آن‌ها تمام مته‌های مورد استفاده جهت سوراخکاری معمولی این ماده شکستند که دلیل آن حلقه زدن پلیسه‌ها به دور ابزار بود. همچنین بهبود قابل توجهی در سوراخکاری ارتعاشی نسبت به سوراخکاری معمولی در دامنه‌های ارتعاشی

مختلف مشاهده شد که دلیل این بهبود تغییر فرآیند برش به یک فرآیند ضربه‌ای بین ابزار و براده تغییر شکل یافته گزارش شد [۲۲].

لیاوو و همکارانش سوراخکاری به کمک اولتراسونیک اینکونل ۷۱۸ را بررسی کردند که نتیجه آن کاهش اندازه براده و تغییرات کمتر گشتاور بود. همچنین هنگام تغییر بسامدها، توانایی سوراخکاری بهبود کمی و در مقابل عمر مته به طور چشم‌گیری در کاربرد ارتعاش با دامنه کم افزایش یافت. اما دامنه‌های ارتعاشی خیلی بزرگ مثل $12\mu\text{m}$ اثرات منفی داشت و در شرایط آزمایش در بسامد $31/8\text{kHz}$ و دامنه $4\mu\text{m}$ بهترین عمر ابزار و بهترین کیفیت سوراخ بدست آمد. تحت این شرایط عمر ابزار $2/7$ برابر بیشتر از فرآیند سوراخکاری بدون کاربرد اولتراسونیک شد. در این فرآیند مانند فرآیند سوراخکاری عمیق به روش مرسوم، نیاز به بیرون آمدن مکرر ابزار از سوراخ جهت خروج براده‌ها و خنک‌کاری نبود، همچنین زمان سوراخکاری کاهش یافت [۲۳].

اونیکورا و همکارانش از یک پیزوالکتریک که 40kHz ارتعاش اولتراسونیک را به اسپیندل دستگاه مته القا می‌نمود، استفاده نمودند. آن‌ها متوجه شدند که استفاده از ارتعاش اولتراسونیک، اصطکاک میان براده و سطح براده را کاهش می‌دهد که موجب ریز شدن براده و کاهش نیروی برش می‌گردد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که استفاده مناسب از مایع خنک‌کار و ابزارهای با پوشش به منظور کاهش اصطکاک میان ابزار و قطعه کار باعث کوچک شدن اندازه پلیسه می‌گردد [۲۲]. باییتسکی و همکارانش در سال ۲۰۰۷ بهبود فرآیند سوراخکاری را در اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به مته گزارش کردند [۲۴].

در سال ۱۹۹۴، شاموتو و موریواکی فرآیند برش ارتعاشی را در دو جهت تحت عنوان ماشینکاری بیضوی انجام دادند. آن‌ها توسط عمل‌کننده پیزوالکتریک، ابزار تراشکاری را در دو جهت (با بسامد 19kHz) ارتعاش دادند و با تحلیل تئوری و تجربی نشان دادند که نیروهای ماشینکاری بسیار کمتر از حالتی است که ارتعاش اولتراسونیک در یک جهت اعمال گردد [۲۵].

آستاشو و همکارانش تحلیل غیر خطی به صورت ضربه ارتعاشی^۱ بر روی فرآیند ماشینکاری ارتعاشی انجام دادند [۲۶]. تحت تاثیر ارتعاش با بسامد بالا، پدیده انتقال الاستوپلاستیک به ویسکوپلاستیک و ایجاد جریان اصطکاک خشک تحقق می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که با اعمال مود ضربه ارتعاش روی قطعه کار، تغییرات زیادی بر ویژگی‌های دینامیکی در این فرآیند حاصل می‌شود. آن‌ها در سال ۲۰۰۴ با کنترل خودتشدید^۲ فرآیند تراشکاری به کمک اولتراسونیک، مود ارتعاشی را در بسامد طبیعی سیستم نگه داشتند. با تغییر بار دینامیکی در فرآیند ماشینکاری، شرایط ارتعاشی سیستم ماشینکاری به کمک اولتراسونیک تغییر می‌نماید که با فیدبک گرفتن پارامترهای نیرویی و

^۱ Vibro-Impact

^۲ Automatic frequency tuning

ارتعاشی و با تغییر دادن زاویه فاز ارتعاشی، می‌توان سیستم را همیشه در مود تشدید نگه داشت و بهترین شرایط را در فرآیند ماشینکاری به کمک اولتراسونیک حاصل نمود [۲۷].

در سال ۲۰۱۱، وکیلی و رازفر تاثیر استفاده از فرآیند سوراخکاری ارتعاشی را روی عمر ابزار و شکل براده‌ها بررسی کردند. آن‌ها افزایش عمر ابزار و کاهش طول براده‌ها را در سوراخکاری ارتعاشی یک فولاد آلیاژی گزارش نمودند [۸].

در تمامی فرآیندهای اولتراسونیک ابزاری به نام هورن^۱ برای انتقال امواج اولتراسونیک به منطقه عملیات استفاده می‌گردد. هورن بسته به نوع فرآیند به غیر از انتقال امواج اولتراسونیک، نقش‌های دیگری نیز بازی می‌کند. به طور نمونه به دلیل کوچکی دامنه ارتعاش حاصل از ترانسدیوسرهای مغناطیسی و یا پیزوالکتریکی، به عنوان تمرکزدهنده انرژی و افزایش دامنه ارتعاش در ماشینکاری اولتراسونیک [۹] و یا گستراننده انرژی در عملیاتی برای کاویتاسیون حجم زیاد آب به کار می‌رود [۲۸]. هورن می‌تواند در بعضی مواقع به عنوان ابزار و یا هلدر (نگهدارنده ابزار) نیز استفاده گردد [۲۲].

برای هر کدام از مودهای ارتعاشی روابط ارتعاشی خاصی بدست آمده است [۲۹]. در مرجع [۳۰] اشاره شده است که معروف‌ترین رابطه را وبستر در سال ۱۹۱۹ برای مود ارتعاش طولی بدست آورد و سپس برای هورن نمایی حل نمود [۳۱]. به دلیل استفاده زیاد مود طولی در کاربردهای مختلف اولتراسونیک، این رابطه به عنوان اصلی‌ترین مبحث برای طراحی هورن شناخته شده است و از طریق آن دامنه و تنش برای هورن‌های ساده (استوانه‌ای، مخروطی، پله‌ای و نمایی) بدست آمده است [۳۲]. در سال ۱۹۷۶، گرین با استفاده از این رابطه توزیع تنش را در یک نمونه آزمایشی بدست آورد [۳۰] و هم او در سال ۱۹۷۹ با حل این رابطه توانست نشان دهد که می‌توان برای ساده‌سازی، منحنی آزمایش کشش (برای آزمایش اثر اولتراسونیک روی جنس) را با دایره تخمین زد [۳۲]. معادله وبستر بعدها برای تحلیل هورن‌هایی که ترکیبی از شکل‌های ساده بودند نیز استفاده شد، به طور نمونه پشکوسکی در سال ۲۰۰۷ این معادله را برای یک هورن پنج‌المانی (ترکیب دو مخروط و سه استوانه) حل نمود و به دستگانه چند معادله چند مجهول رسید، سپس آن را با برنامه‌ای که نوشته بود، حل کرد. ورودی‌های برنامه‌ای که او ایجاد نمود بسامد ارتعاش هورن، ویژگی‌های صوتی و استحکام خستگی جنس هورن و نسبت قطر به طول المان‌های هورن بود. خروجی برنامه او ضریب تقویت (نسبت دامنه خروجی از هورن به دامنه ورودی به آن)، و کلا دامنه در خروجی هر کدام از المان‌های هورن بود. در نهایت پشکوسکی به هورنی دست یافت که بیشترین کاویتاسیون را در آب داشته باشد [۲۸].

با تغییر و یا ترکیب هورن‌های ساده، هورن‌های جدیدی ایجاد می‌گردند که برای موارد مختلف کاربرد دارند. در سال ۱۹۹۵، امین و همکارانش هورن سه‌المانی را که ترکیبی از استوانه و مخروط بود برای رسیدن به دامنه