دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی پارامترهای موثر در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

دانشجو

محمد خلخال

استاد راهنما

دکتر مهرداد وحدتی

سال ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

نام دانشکده: دانشکده مهندسی مکانیک

نام دانشجو: محمد خلخال

عنوان پایان‌نامه یا رساله: بررسی تجربی پارامترهای موثر در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی مکانیک

گرایش: ساخت و تولید

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر مهرداد وحدتی	استادیار	خواجه نصیر طوسی	
۷	استاد مدعو داخلی	دکتر مجید قریشی	دانشیار	خواجه نصیر طوسی	
۸	استاد مدعو داخلی	دکتر مهدی ظهور	استادیار	خواجه نصیر طوسی	

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب محمد خلخال بـه شـماره دانشـجویی ۹۰۰۳۲۹۴ دانشـجوی رشـته سـاخت و تولیـد مقطـع تحصیلیکارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رسـاله حاصـل کـار اینجانـب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامـل مشخصـات منبع ذکر کرده‌ام. درصورت اثبات خلاف مندرجات فوق، بـه تشـخیص دانشـگاه مطـابق بـا ضـوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونـه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیـین تخلـف و مجـازات را از خـویش سـلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونـه پاسـخگویی بـه اشـخاص اعـم از حقیقـی و حقـوقی و مراجـع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ... ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما: دکتر مهرداد وحدتی

تاریخ:

امضا:

چکیده

ماشینکاری اولتراسونیک یک راه حل مناسب برای صنعت جهت ماشینکاری مواد سخت و ترد و شکننده می باشد. استفاده از هر روش و دستگاه ماشینکاری مستلزم شناخت کامل فرایند، طراحی و مهندسی پارامترهای متغیر و دانش فنی تاثیر پارامترهای ورودی بر نتایج و خروجی های ماشینکاری می باشد. فرایند ماشینکاری اولتراسونیک یک روش نوین و جدید ماشینکاری می باشد که هنوز به طور کامل تمامی جزئیات آن، تاثیر پارامترهای آن بر نتایج ماشینکاری مشخص نمی باشد. این روش ماشینکاری در صنعت ایران هم اکنون جایگاهی ندارد و در صنعت علی رغم نیاز بسیار زیاد به این فرایند هنوز شناخت کامل وجود ندارد و عملا این تکنولوژی به ندرت استفاده می شود. این فرایند کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف نفت و گاز، نیروگاهی، نظامی، تجهیزات الکترونیک، خودرو، هوافضا و... دارد. در این پژوهش ابتدا به طور کامل فرایند ماشینکاری اولتراسونیک و چگونگی براده برداری از قطعه، تئوری ها، مشخصات، ویژگی ها و قوانین ریاضی حاکم بر آن بیان گردیده است. سپس اجزا و قطعات دستگاه ماشینکاری ارتعاشات اولتراسونیک طراحی و مهندسی شده اند. پس از تهیه و آماده سازی دستگاه ماشینکاری اولتراسونیک اقدام به انجام آزمایشات و بررسی تجربی تاثیر پارامترهای فرکانس ارتعاشات، دامنه ارتعاشات، شکل متمرکزکننده، جنس قطعه کار، جنس ابزار، سرعت دوران ابزار ، فشار استاتیک ابزار و نوع موج ورودی بر روی صافی سطح و نرخ براده برداری شده است. درنهایت با تحلیل داده های حاصل از آزمایشات تجربی، ارتباط بین پارامترهای فرایند به گونه ای که به انتخاب صحیح پارامترها و قطعات در ماشینکاری اولتراسونیک منجر شود و بتوان با صرف انرژی کمتر به دقت، کیفیت، صافی سطح بهتر و نرخ براده برداری بیشتری در ماشینکاری مواد ترد و سخت و شکننده دست یافت، بیان گردیده شده است. در این پژوهش نتیجه گیری شد که صافی سطح قطعات با مجذور فرکانس ارتعاشات مبدل رابطه مستقیم دارند و افزایش فرکانس ارتعاشات باعث افزایش نرخ براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک می گردد، متمرکزکننده نمایی در مقایسه با متمرکزکننده پله ای صافی سطح بهتری را ایجاد می کند، طراحی متمرکزکننده تاثیر بسیار زیادی بر نرخ براده برداری دارد.. با افزایش سرعت دورانی ابزار میزان صافی سطح به شدت بهبود می یابد، افزایش سرعت دورانی ابزار تا فرکانس رزنانس اول ابزار تاثیر مثبت در نرخ براده برداری دارد و باعث افزایش نرخ براده برداری می گردد . نوع موج ورودی که توسط ژنراتور تولید می شود بر صافی سطح قطعات تاثیر دارد . در حالت استفاده از موج سینوسی ، صافی سطح بهتری نسبت به حالت موج مستطیلی و دندانه ای حاصل می گردد و در حالت موج مستطیلی صافی سطح بهتری نسبت به موج دندانه ای حاصل می گردد. نوع موج ورودی تاثیری در نرخ براده برداری ندارد. افزایش فشار استاتیک صافی سطح را کاهش می دهد .در حالت افزایش همزمان فرکانس ارتعاشات و فشار استاتیک اگرچه صافی سطح افزایش می یابد ولی افزایش فشار استاتیک ، شدت این افزایش را کاهش می دهد و فشار استاتیک تاثیر فرکانس ارتعاشات را تحت تاثیر خود قرار می دهد و با افزایش فشار استاتیک نرخ براده برداری به شدت افزایش می یابد. برای متریال های با سختی بالاتر ، ماشینکاری اولتراسونیک با سهولت بیشتری انجام می گیرد و صافی سطح بهتری حاصل می گردد.

کلمات کلیدی

ماشینکاری اولتراسونیک- فرکانس ارتعاشات- مبدل- متمرکز کننده- فشار استاتیک- موج ورودی- صافی سطح- نرخ براده برداری

فهرست مطالب

فصل اول : مروری بر تحقیقات و منابع ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- معرفی روش ماشینکاری اولتراسونیک ۲

فصل دوم : تئوری ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- تجهیزات ۸

۲-۳- فرایند ماشینکاری ارتعاشات اولتراسونیک ۱۰

۲-۴- پارامترهای فرایند ماشینکاری اولتراسونیک ۱۱

۲-۵- جابجایی و حرکت ذرات ساینده در ماشینکاری اولتراسونیک ۱۱

۲-۶- مکانیزم براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک ۱۲

۲-۷- مکانیزم براده برداری توسط ذرات ساینده کروی ۱۴

۲ـ۷ـ۱ـ عمق برش ۱۶

۲ـ۷ـ۲ـ نیروی برش ۱۶

۲ـ۷ـ۳ـ حجم براده تولید شده ۱۷

فصل سوم : طراحی ۱۹

۳-۱- مقدمه ۲۰

۳-۲- مبدل ۲۰

۳-۳- انتخاب متمرکز کننده ها ۲۱

۳-۴- متمرکزکننده پله ای ۲۲

۳-۵- متمرکزکننده نمایی ۲۶

۳-۶- ابزارگیر ۲۸

۳-۷- ابزار ۲۹

۳-۸- سیستم اعمال فشار بر روی ابزار ۳۰

۳-۹- مدل سه بعدی دستگاه ماشینکاری اولتراسونیک ۳۱

فصل چهارم : آزمایشات ۳۳

۴-۱- مقدمه ۳۴

۴-۲- معرفی پارامترهای ورودی ۳۴

۴-۲-۱-نوع امواج ۳۴
۴-۲-۲-مبدل ۳۵
۴-۲-۳-متمرکزکننده ها ۳۵
۴-۲-۴-نحوه اتصال متمرکزکننده با مبدل و ابزار با ابزار گیر ۳۵
۴-۲-۵-ابزارگیر ۳۶
۴-۲-۶-ابزار ۳۶
۴-۲-۷-طراحی سیستم اعمال فشار استاتیک به ابزار ۳۷
۴-۲-۸-مواد ساینده ۳۷
۴-۲-۹-سیستم شستشو موضع ماشین کاری ۳۸
۴-۳-پارامترهای خروجی در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک : ۳۸
۴-۴- پارامترهای انتخاب شده ۳۹
۴-۵- انجام آزمایشات ۳۹
۴-۶- شایط متغیرهای آزمایش ها ۴۰
۴-۷- اندازه گیری پارامترهای خروجی ۴۰
فصل پنجم : بررسی و تحلیل آزمایشات ۴۴
۵-۱- مقدمه ۴۵
۵-۲- بررسی تاثیر فرکانس ارتعاشات اولتراسونیک بر صافی سطح ۴۵
۵-۳- بررسی تاثیر جنس قطعه کار بر صافی سطح ۴۹
۵-۴- بررسی تاثیر نوع موج ورودی بر صافی سطح ۵۱
۵-۵- بررسی تاثیر سرعت دوران ابزار بر صافی سطح ۵۴
۵-۶- بررسی تاثیر فشار استاتیک بر صافی سطح ۵۵
۵-۷- بررسی تاثیر فرکانس ارتعاشات بر نرخ براده برداری (MRR) ۵۷
۵-۸- بررسی تاثیر شکل متمرکزکننده بر نرخ براده برداری ۶۰
۵-۹- بررسی تاثیر سرعت دوران ابزار بر نرخ براده برداری ۶۲
۵-۱۰- بررسی تاثیر نوع موج ورودی بر نرخ براده برداری ۶۵
۵-۱۱- بررسی تاثیر جنس قطعه کار بر نرخ براده برداری ۶۷
۵-۱۲- بررسی تاثیر فشار استاتیک بر نرخ براده برداری ۷۰
فصل ششم : نتایج ۷۴
۶-۱- نتایج ۷۵

۶-۲- پیشنهاد برای ادامه کار ۷۷
۶-۳- مراجع ۷۸
پیوست -۱ نقشه های ساخت دستگاه ماشینکاری اولتراسونیک ۸۱
پیوست -۲ جدول شرایط متغیرهای آزمایش ها ۸۵
پیوست -۳ جدول نتایج تست ها ۱۰۱

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ شماتیک دستگاه ماشین کاری اولتراسونیک..... ۸

شکل ۲-۲ عملکرد هورن به عنوان تقویت کننده مکانیکی دامنه ارتعاشات..... ۹

شکل ۲-۳ شماتیک هورن های مختلف مورد استفاده در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک..... ۹

شکل۲-۴ فرایند ماشینکاری اولتراسونیک..... ۱۰

شکل ۲-۵ جابجایی ذرات ساینده..... ۱۱

شکل ۲-۶ شماتیک گریت ساینده..... ۱۳

شکل ۲-۷ عکس العمل بین ذرات ساینده، قطعه کار و ابزار..... ۱۳

شکل ۲-۸ عکس العمل بین ذرات ساینده، قطعه کار و ابزار..... ۱۴

شکل ۲-۹ تغییر در موقعیت ابزار به دلیل ارتعاشات اولتراسونیک ابزار..... ۱۴

شکل۲-۱۰ ناحیه تماس بین ذرات ساینده و قطعه کار..... ۱۵

شکل۲-۱۱ پروسه شکل گیری ترک و رشد آن در یک سیکل..... ۱۵

شکل۳- ۱ مبدل از نوع پیزوالکتریک..... ۲۰

شکل۳- ۲ مبدل از نوع مگنتوستریکتیو ۲۰

شکل ۳-۳ نمونه هایی از مبدل که به متمرکزکننده متصل است..... ۲۱

شکل ۳-۴ بعضی از انواع متمرکزکننده های متداول مورد استفاده در ماشینکاری اولتراسونیک..... ۲۱

شکل۳-۵ منحنی تغییرات ضریب تقویت دامنه..... ۲۳

شکل ۳-۶ منحنی طول تشدید متمرکزکننده نمایی بر اساس نسبت اقطار مقاطع بزرگ و کوچک..... ۲۷

شکل ۳-۷ نمونه ای از ابزارگیر که توسط رزوه و پین به ابزار متصل شده است..... ۲۸

شکل ۳-۸ ابزار دستگاه ماشینکاری اولتراسونیک..... ۲۹

شکل ۳-۹ سیستم اعمال فشار استاتیک بر روی ابزار از نوع هیدرولیکی..... ۳۰

شکل ۳-۱۰ مدل سه بعدی دستگاه ماشینکاری اولتراسونیک..... ۳۱

شکل ۳-۱۱ مدل سه بعدی دستگاه ماشینکاری اولتراسونیک..... ۳۲

شکل ۴-۱ نمونه ای از امواج سینوسی، مستطیلی و دندانه ای..... ۳۴

شکل ۴-۲ نمونه ای از متمرکزکننده مخروطی..... ۳۵

شکل ۴-۳ نمونه ای از ابزار گیر مورد استفاده در ماشینکاری اولتراسونیک..... ۳۶

شکل ۴-۴ ابزارهای مورد استفاده در ماشینکاری اولتراسونیک..... ۳۷
شکل۴-۵ دستگاه پروفایل متر برای اندازه گیری صافی سطح..... ۴۰
شکل۴-۶ نمونه ای از گزارش اندازه گیری صافی سطح دستگاه profilometer..... ۴۱
شکل ۵-۱ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس ارتعاشات..... ۴۶
شکل ۵-۲ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس ارتعاشات و فشار استاتیک..... ۴۷
شکل ۵-۳ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس ارتعاشات و شکل متمرکزکننده..... ۴۸
شکل ۵-۴ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس و جنس قطعه کار..... ۵۰
شکل ۵-۵ نمونه ای از گزارش صافی سطح مربوط به آزمایش ۲۸۶..... ۵۰
شکل ۵-۶ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس و نوع موج ورودی برای شرایط جدول ۵-۵..... ۵۲
شکل ۵-۷ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس و نوع موج ورودی برای شرایط جدول ۵-۶..... ۵۳
شکل ۵-۸ نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس و نوع موج ورودی برای شرایط جدول ۵-۷..... ۵۴
شکل ۵-۹ : نمودار صافی سطح بر حسب فرکانس و دوران ابزار..... ۵۵
شکل ۵-۱۰ نمودار صافی سطح بر حسب فشار استاتیک..... ۵۶
شکل ۵-۱۱ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات برای شرایط جدول۵-۱۰..... ۵۸
شکل ۵-۱۲ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات برای شرایط جدول ۵-۱۱..... ۵۹
شکل ۵-۱۳ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و شکل متمرکز کننده. برای شرایط جدول ۵-۱۲..... ۶۰
شکل ۵-۱۴ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و شکل متمرکز کننده برای شرایط جدول ۵-۱۳..... ۶۱
شکل ۵-۱۵ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و شکل متمرکز کننده برای شرایط جدول ۵-۱۴..... ۶۲
شکل ۵-۱۶ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و سرعت دوران ابزار برای شرایط جدول ۵-۱۵..... ۶۳
شکل ۵-۱۷ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و سرعت دوران ابزار برای شرایط جدول۵ -۱۶..... ۶۴
شکل ۵-۱۸ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و نوع موج ورودی برای شرایط جدول ۵-۱۷..... ۶۶
شکل ۵-۱۹ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و نوع موج ورودی برای شرایط جدول ۵-۱۸..... ۶۷
شکل ۵-۲۰ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و جنس قطعه کار برای شرایط جدول ۵-۱۹..... ۶۸
شکل ۵-۲۱: نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و جنس قطعه کار برای شرایط جدول ۵- ۲۰..... ۶۹
شکل ۵-۲۲ : نمودار نرخ براده برداری بر حسب فرکانس ارتعاشات و جنس قطعه کار برای شرایط جدول ۵-۲۱..... ۷۰
شکل ۵-۲۳: نمودار نرخ براده برداری بر حسب فشار استاتیک برای شرایط جدول ۵-۲۲..... ۷۱

شکل ۵-۲۴ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فشار استاتیک برای شرایط جدول ۵-۲۳..... ۷۲
شکل ۵-۲۵ نمودار نرخ براده برداری بر حسب فشار استاتیک برای شرایط جدول ۵-۲۴..... ۷۳

فهرست جداول

جدول ۲-۱ : تعدادی از مواد هایی که به روش ارتعاشات اولتراسونیک ماشینکاری شده اند..... ۱۰

جدول ۴-۱: مشخصات مکانیکی و ترکیب شیمیایی مواد های مورد استفاده در آزمایش ها..... ۳۹

جدول ۴-۲ : شرایط متغیرهای آزمایش..... ۴۰

جدول۴-۳ : شرایط، مشخصات و تنظیمات متغیرهای آزمایش ها..... ۴۲

جدول ۴-۴ : نتایج آزمایش ها..... ۴۳

جدول ۵-۱: متغیر های آزمایش..... ۴۶

جدول ۵-۲ : متغیرهای ازمایش..... ۴۷

جدول ۵-۳ : متغیرهای آزمایش..... ۴۸

جدول ۵-۴ : متغیر های آزمایش..... ۴۹

جدول ۵-۵ : متغیر های آزمایش..... ۵۱

جدول ۵-۶ : متغیرهای آزمایش..... ۵۲

جدول ۵-۷ : متغیرهای آزمایش..... ۵۳

جدول ۵-۸ : متغیرهای آزمایش..... ۵۴

جدول ۵-۹ : متغیرهای آزمایش..... ۵۶

جدول ۵-۱۰: متغیرهای آزمایش..... ۵۷

جدول ۵-۱۱ : متغیرهای ازمایش..... ۵۸

جدول ۵-۱۲ : متغیرهای آزمایش..... ۶۰

جدول ۵-۱۳ : متغیرهای آزمایش..... ۶۱

جدول ۵-۱۴ : متغیرهای آزمایش..... ۶۲

جدول ۵-۱۵ : متغیرهای ازمایش... ..... ۶۳

جدول ۵-۱۶ : متغیرهای ازمایش..... ۶۴

جدول ۵-۱۷ : متغیرهای آزمایش..... ۶۵

جدول ۵-۱۸ : متغیرهای آزمایش..... ۶۶

جدول ۵-۱۹: متغیرهای آزمایش..... ۶۷

جدول ۵-۲۰ : متغیرهای آزمایش..... ۶۸

جدول ۵-۲۱ : متغیرهای آزمایش..... ۶۹
جدول ۵-۲۲ : متغیرهای آزمایش..... ۷۱
جدول ۵-۲۳ : متغیرهای آزمایش..... ۷۲
جدول ۵-۲۴ : متغیرهای آزمایش..... ۷۳

فصل اول

مروری بر تحقیقات و منابع

۱-۱- مقدمه

ماشینکاری به روش ارتعاشات اولتراسونیک (USM[۱]) یک روش ماشینکاری مکانیکی می باشد که محدوده وسیعی از قطعات را با اشکال و خواص مختلف در بر می گیرد. با توجه به ماهیت غیر شیمیایی و غیر الکتریکی و غیر حرارتی بودن این فرایند، موفقیت در ماشینکاری مواد سخت و ترد از خصوصیات بارز این روش براده برداری است. قطعات سخت و ترد که دارای مقاومت الکتریکی زیادی باشند با روش های سنتی به دلیل سختی و شکندگی و نیز با روش های غیر سنتی به دلیل عایق بودن قابل ماشینکاری نیستند و روش ارتعاشات اولتراسونیک بهترین انتخاب برای ماشینکاری آن هاست. در این روش محدودیتی در سختی مواد نیست، بلکه به عکس در نرمی آن ها محدودیت وجود دارد، به طوری که ماشینکاری موادی با سختی کمتر از ۳۰ RC توصیه نمی شود.

ماشینکاری اولتراسونیک روشی نوین برای ماشینکاری مواد ترد و شکننده مانند شیشه، سرامیک و نیمه هادی می‌باشد. از ماشینکاری اولتراسونیک می‌توان برای ماشینکاری مواد چغر مانند تیتانیوم نیز استفاده کرد.

به وجود آمدن و استفاده از روش ارتعاشات اولتراسونیک برای ماشینکاری، به دلیل مشکلاتی بود که در ماشینکاری مواد سخت و ترد جدید از جمله آلیاژ های تنگستن و تیتانیوم کارباید، فولاد های سخت، الماس، ژرمانیم، سیلیکن، فریت ها، شیشه، سرامیک ها و کوارتز وجود داشت. با استفاده از این روش ماشینکاری طیف وسیعی از مواد با سختی بالا در ابعاد و اشکال مختلف در صنعت ممکن گردید.

۱-۲- معرفی روش ماشینکاری اولتراسونیک

در روش ماشینکاری اولتراسونیک از طریق مبدل[۲] ، انرژی الکتریکی فرکانس بالا به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌شود و پس از آن به دستگاه تقویت کننده انتقال می‌یابد تا تمرکز انرژی بیشتری حاصل گردد. این امر باعث می‌شود ابزار در راستای طولی با فرکانس بالای ۲۰KHz با دامنه ۱۲-۵۰ µm ارتعاش کند. محدوده توان آن نیز بین ۵۰W-۳۰۰۰ است. در ضمن یک بار استاتیکی کنترل شده به ابزار وارد می‌شود. مایع ساینده که حاوی سیلیکون کارباید، کاربید بور یا اکسید آلومینیوم است، به طور پیوسته در فضای خالی[۳] ابزار و قطعه کار تزریق می‌شود. ارتعاش ابزار موجب می‌شود ذرات ساینده در مایع فشرده شوند و به سطح قطعه کار برخورد کنند. این امر باعث ریز تراشی قطعه کار می‌شوند[۱].

ماشینکاری میکرو اولتراسونیک یک فرایند ماشینکاری مخصوص و مناسب برای مواد سخت و شکننده است. در ماشینکاری اولتراسونیک قطعه کاری که در میز مخصوص خود ثابت شده است با فرکانس (۲۰ KHz) ارتعاش می‌کند و مایع ساینده به بالای قطعه کار تزریق می‌شود. یک ابزار چرخشی نیز موجب برخورد ذرات ساینده در مایع با قطعه کار می‌شود. خنک کننده[۴] در کاهش حرارت اصطکاکی ناشی از جابجایی ذرات ساینده بر روی قطعه کار و حرارت تولیدی توسط ارتعاشات ترانسدیوسر عمل می‌کند[۲].

---

۱ Ultrasonic machining
۲ transducer
۳ gap
۴ coolant

Jatinder kumar و Vinod kumar استفاده از ماشینکاری اولتراسونیک در ماشینکاری تیتانیوم خالص (ASTM Grade I) و ارزیابی نرخ سایش ابزار در شرایط تحت کنترل آزمایشگاه را بررسی کردند. تنظیمات بهینه پارامترها از طریق آزمایش و آنالیز با استفاده از روش Taguchi انجام شد. به طور کلی هدف آن‌ها بهینه سازی پارامترهای ماشینکاری اولتراسونیک تیتانیوم خالص با نرخ سایش ابزار (TWR[1])بود.

آن ها چهار پارامتر جنس ابزار، نوع ذرات ساینده، اندازه ذرات ساینده و توان ماشین را بررسی کردند. آن ها در آزمایشات خود از پنج نوع ابزار با جنس های فولاد پرکربن، فولاد سرعت بالا، کربن سیمنتیت، تیتانیوم و آلیاژ های تیتانیوم با هندسه شافت استوانه ای به قطر ۸ میلیمتر استفاده کردند. آن ها نتیجه گرفتند که جنس ابزار تاثیر بسیار زیادی بر نرخ سایش دارد و کمترین نرخ سایش ابزار را آلیاژهای تیتانیوم دارند. هم چنین آن ها مشاهده کردند که نوع ماده ساینده نیز بر نرخ سایش ابزار تاثیر دارد و نتیجه گرفتند که سیلیکن کارباید در مقایسه با آلومینا نرخ سایش ابزار بیشتری را موجب می شود. [۱]

Z.J.Pei و P.M.Ferreira و S.G.Kapoor و M.Haselkorn سعی کردند روش جدیدی را برای گسترش ماشینکاری اولتراسونیک برای ماشینکاری سطوح صاف ارائه کنند. آن ها با آنالیز عکس های میکروسکوپی سطح (SEM[2]) سعی کردند مکانیزم براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک را مطالعه کنند. آنالیز SEM به آن ها کمک کرد تا به این نتیجه برسند که مکانیزم براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک چرخشی شامل ترکیب دو مکانیزم شکست ترد و گسترش ترک می باشد. آن ها در مکانیزم خود سطح برش ابزار را یک سطح مخروطی در نظر گرفتند. در این سطح مخروطی عکس العمل بین ذرات ساینده و سطح قطعه کار همانند ماشینکاری اولتراسونیک برای ماشینکاری سوراخ ها می باشد. هم چنین آن ها نیروی برش را در دو جهت محور ابزار و نرخ تغذیه اندازه گرفتند و به تحلیل نیروی برشی در آزمایشات خود پرداختند. آن ها نیروی برشی را بررسی و مشاهده کردند که نیروی برشی در طول یک پالس ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و با شروع پالس دیگر دوباره همین روند تکرار می گردد. از این مشاهدات نتیجه گرفتند که برای افزایش نرخ براده برداری، نرخ پیشروی را همزمان با شروع پالس که نیروی برشی افزایش می یابد شروع و هم فاز کنند. [۴] .

D.Liu و W.L.Cong بر روی مدل نیروی برشی برای فرایند ماشینکاری اولتراسونیک مواد ترد کار کردند. آن ها معتقدند که دانستن نیروی ماشینکاری می تواند در بهینه سازی متغیرهای ورودی کمک کند. آن ها مدل مکانیکی برای نیروی برشی را با فرض اینکه شکست ترد به عنوان مکانیزم اولیه براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک است، ارائه کردند. بر اساس این مدل مکانیکی رابطه بین نیروی برشی و متغیرهای ورودی (از جمله سرعت اسپیندل، سایز و غلظت مواد ساینده) در این مدل پیش بینی شده است. در این مدل از یک نسبت برای مقایسه بین نرخ براده برداری واقعی توسط یک ذره ساینده در یک سیکل ارتعاشاتی به نرخ براده برداری تئوری توسط یک ذره ساینده، استفاده شده است. هم چنین آن ها مدلی را برای رابطه بین نیروی برشی و ماکزیمم عمق نفوذ ذرات ساینده ارئه کردند. آن ها از آزمایشات تجربی نتیجه گرفتند که نیروی برشی با افزایش غلظت ذرات ساینده و نرخ تغذیه افزایش می یابد و با افزایش اندازه ذرات ساینده، مقدار دامنه ارتعاشات و سرعت اسپیندل، نیروی برشی کاهش می یابد. [۵]

[1] Tool wear rate
[2] Scanning electron microscope

Probhakar و همکارانش به بررسی ماشینکاری اولتراسونیک و مدل شکست با اعمال تئوری پیشرفت و توسعه ترک پرداختند. مدل در ابتدا سعی می کند تا نرخ براده برداری در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک را بر اساس این فرض که مکانیزم اولیه براده برداری، شکست ترد می باشد، پیش بینی کند، این مدل برای منیزیم زیرکونیم نتایج خوبی نسبت به آزمایشات تجربی بدست آورد. آن ها فرایند ماشینکاری اولتراسونیک چرخشی را ترکیبی از پروسه ماشینکاری اولتراسونیک و فرایند سنگ زنی الماس در نظر گرفتند. آن ها برای ارائه مدل نرخ براده برداری برای فرایند ماشینکاری اولتراسونیک چرخشی، فرایند ماشینکاری اولتراسونیک را در نظر گرفتند و اثرات چرخش ابزار را بر روی آن بررسی کردند. آن ها برای آنکه بتوانند مدل خود را ارائه کنند اظهار داشتند که باید عمقی که ذرات ساینده در سطح قطعه کار نفوذ می کند، نیروی تماسی بین ذرات ساینده و قطعه کار، حجم مواد حذف شده توسط یک ذره ساینده در یک سیکل ارتعاشات اولتراسونیک و جمع بندی اثرات ذرات ساینده را بدست آورند. آن ها از معادله الاستیک هرتز برای بدست آوردن رابطه بین نیروی تماسی و عمق نفوذ استفاده کردند. آن ها معتقد بودند که نرخ سایش ابزار و صافی سطح قطعه کار از فاکتورهای مهمی است که باید در کنار نرخ براده برداری مطالعه شوند ولی این بررسی را انجام ندادند. [۶]

H.Hocheng و K.L.Kuo نرخ سایش ابزار را در حالت سرعت رزنانس ابزار بررسی کردند. آن ها نشان دادند که بین طول ابزار و فرکانس رزنانس ابزار رابطه وجود دارد. آن ها به این نتیجه رسیدند که فرکانس رزنانس ابزار با طول آن رابطه معکوس دارد و با کاهش طول ابزار، فرکانس رزنانس آن افزایش می یابد. در نتیجه در حین ماشینکاری با سایش ابزار، طول ابزار کوتاه تر شده و فرکانس رزنانس آن تغییر می کند، برای جبران این تغییرات باید فرکانس ارتعاشات تغییر کند تا همواره ماشینکاری در حالت بهینه انجام شود. با استفاده از سیگنال فرکانس ژنراتور، سایش ابزار به طور پیوسته می تواند بررسی شود. آن ها فرکانس رزنانس را به دو صورت تجربی و محاسبات آنالیز مودال ارتعاشات بدست آوردند که نتایج محاسبات با آزمایشات تجربی ۵٪ اختلاف دارد. هم چنین مشاهده کردند که سایش ابزار در ابتدا با شدت بیشتری روند افزایشی دارد و در ادامه با شدت کمتری افزایش می یابد، آن ها اظهار داشتند که اندازه گیری سایش ابزار در ابتدای ماشینکاری از اهمیت بیشتری برخوردار است. آن ها در آزمایشات خود از دو نوع متمرکز کننده مخروطی و نمایی استفاده کردند. [۷]

G.Ya و H.W.Qin جابجایی ذرات ساینده در موضع نوک ابزار را در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک آنالیز کردند. آن ها شکل گیری و پیشرفت ترک را با فرض اینکه تمام ذرات ساینده به شکل کروی هستند آنالیز کردند. آن ها اظهار داشتند که شکل گیری و پیشرفت ترک به خواص مکانیکی قطعه کار (سختی، چقرمگی، ضریب الاستیسیته)، حالت اولیه سطح قطعه کار (چگالی، اندازه ترک ها)، شکل بارگذاری (شکل هندسی ذرات ساینده) و سرعت بارگذاری بستگی دارد. آن ها از تئوری هرتز برای تحلیل تنش در قطعه کار استفاده کردند. آن ها برخورد ذرات ساینده در موضع ماشینکاری به سطح قطعه کار را عامل اصلی نرخ براده برداری در نظر گرفتند. آن ها مکانیزم ماشینکاری اولتراسونیک با سیستم کنترل CNC را آنالیز و مدل ریاضی برای نرخ براده برداری در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک ارائه کردند.. آن ها در مدل ریاضی خود نشان دادند که پارامترهای فشار استاتیک بر روی ابزار، اندازه و غلظت ذرات ساینده، خواص مکانیکی قطعه کار، جنس ابزار، سرعت دورانی ابزار و نرخ تغذیه قطعه کار بر نرخ براده برداری تاثیر دارند. [۸]

F.Wei-Haw و C.Choung- Lii و C.Wen-Chen و همکارانشان بر روی یکپارچگی سطح قطعات ماشینکاری شده به روش ماشینکاری اولتراسونیک کار کردند و به دنبال روشی برای کاهش ترک های پراکنده روی سطوح و در نتیجه افزایش صافی سطح در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک بودند. آن ها تاثیر پارامترهای نوع مواد ساینده، غلظت و اندازه مواد ساینده و نرخ تغذیه را بر صافی سطح را بررسی کردند. آن ها فرایند ماشینکاری اولتراسونیک چند مرحله ای را ارائه دادند که در آن به صافی سطح کمتر از μm ۰/۲ دست یافتند. و مشاهده کردند که در هنگام استفاده از ذرات ساینده با اندازه بزرگ و نرخ تغذیه سریع، سطحی خشن به همراه ترک های با عمق زیاد بدست می آید. هم چنین آن ها اظهار داشتند که به هنگام استفاده از مواد ساینده با غلظت بالا، ذرات ساینده به جای براده برداری از سطح قطعه کار، آن را پرس و فشرده می کنند و در واقع به جای فرایند ماشینکاری، فرایند شکل دهی و تغییر شکل سطح قطعه کار انجام می گیرد. آن ها فرایند ماشینکاری اولتراسونیک چند مرحله ای را با ترکیب ذرات ساینده ریز و درشت و نرخ تغذیه آهسته و سریع برای افزایش یکپارچگی سطح و افزایش بازده ماشینکاری ارائه کردند. بدین صورت که ابتدا ماشینکاری را با ذرات ساینده درشت و نرخ تغذیه سریع انجام می دهند و برای سایز کردن قطعه در نهایت از ماشینکاری با ذرات ریز و نرخ تغذیه بسیار آهسته استفاده می کنند. آن ها اظهار داشتند که با این روش به صافی سطح کمتر از μm ۰/۲ دست یافتند. [۹]

B.Ghahramani و Z.Y.Wang بر روی تحلیل فرایند ماشینکاری اولتراسونیک، مکانیزم، دینامیک و رفتار آن کار کردند. آن ها از روش فتوالاستیک برای شبیه سازی ابزار در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک استفاده کردند. آن ها اظهار داشتند که استفاده از این روش موجب دانستن توزیع تنش در نقاط مختلف در بار گذاری های متفاوت می شود. آن ها برای تحلیل تنش به صورت تئوری از معادلات تیموشنکو استفاده کردند. آن ها بیان کردند که از تحلیل ریز ساختار سطح ماشینکاری شده بوسیله ذرات ساینده، دو ناحیه در براده برداری قطعه کار وجود دارد، ناحیه پلاستیک در نقطه برخورد و ناحیه شکست ترد که در زیر ناحیه پلاستیک قرار دارد. آن ها از آزمایش برخورد دینامیکی نتیجه گرفتند که براده برداری در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک به سرعت برخورد ذرات ساینده بستگی دارد، در سرعت برخورد پایین، براده برداری در ناحیه پلاستیک به دلیل نابجایی ذرات انجام می شود. در سرعت های بالاتر براده برداری به دلیل رشد و پیشرفت ترک ها می باشد. [۱۰]

V.Kumar و J.Kumar با استفاده از روش المان محدود سعی کردند مدلی ارائه دهند تا تنش ها و کرنش های مکانیکی تولیدی در ابزار در طی فرایند ماشینکاری اولتراسونیک را پیش بینی کنند. هم چنین آن ها با استفاده از ماژول CFX در نرم افزار ANSYS رفتار سیال ساینده در موضع ماشینکاری را مطالعه کردند. آن ها در شبیه سازی خود ابزار را به ۲۰ گره تقسیم بندی کردند و از المان های مثلث شکل استفاده کردند. در تعریف شرایط مرزی، جابجایی سطح بالایی ابزار را صفر در نظر گرفتند و همه درجه آزادی های آن را مقید کردند و نیروی هارمونیک ۴/۲ kg را به سطح پایینی وارد کردند که با فرکانس ۲۰۰۰۰ هرتز به سطح قطعه کار برخورد می کند. سرعت ذرات ساینده در ناحیه سوراخ یا موضع ماشینکاری را ثابت در نظر گرفتند. آن ها در شبیه سازی خود به این نتیجه رسیدند که تنش و کرنش با افزایش فرکانس در ابزار کاهش می یابد. آن ها در شبیه سازی رفتار سیال ساینده در موضع ماشینکاری به این نتیجه رسیدند که اگر نازل سیال در فاصله ۱۰ mm از موضع ماشینکاری قرار بگیرد، بازده نازل سیال ساینده به ماکزیمم مقدار خود می رسد. [۱۱]

Z.C.Li و Liang-wa Cai و همکارانش بر کاهش پلیسه لبه ها و پخ ها در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک پرداختند. آن ها از آنالیز سه بعدی المان محدود برای مطالعه پارامترها استفاده کردند. آن ها برای پیش بینی رابطه بین ضخامت پلیسه لبه و عمق برش از دو تئوری ماکزیمم تنش نرمال و تنش ون مایسز استفاده کردند. آن ها راه حلی را برای کاهش پلیسه لبه ها در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک بر پایه شبیه سازی المان محدود ارائه کردند و آن را با انجام آزمایشات کنترل و تایید کردند. آن ها فرض کردند که شکل گیری پلیسه لبه ها از شکست ترد شروع می شود. آن ها در مدل المان محدود خود ضخامت پلیسه را فاصله عمودی محل اولیه تشکیل پلیسه از سطح پایینی قطعه کار در نظر گرفتند. آن ها سه پارامتر عمق برش که فاصله بین سطح بالایی قطعه کار و سطح افقی ماشین است، طول شعاعی ناحیه تماس بین قطعه کار و فیکسچر و نیروی اعمالی به بالای سطح قطعه کار را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند که تنش با افزایش عمق برش و افزایش نیروی اعمالی به قطعه کار افزایش می یابد. آن ها نتیجه گرفتند که هر دو تنش نرمال ماکزیمم و تنش ون مایسز با کاهش فاصله با لیه افزایش می یابد و بیشترین تنش در لیه اتفاق می افتد. آن ها نتیجه گرفتند که با افزایش شعاع ناحیه تماس ضخامت پلیسه لبه کاهش می یابد. [۱۲].

Y.Ichida و R.Sato و همکارانشان بر روی تاثیر نوع سیال بر سطح و مکانیزم براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک کار کردند. آن ها در آزمایشات خود از پنج نوع سیال استفاده کردند، وقتی از آب به عنوان سیال استفاده کردند، حفره های گرد عمیقی در سطح قطعه کار مشاهده کردند. همچنین هنگامیکه از الکل متیل به عنوان سیال استفاده کردند این حفره ها ولی با سایز کوچکتر دیده شدند. آن ها از مشاهدات خود نتیجه گرفتند که نرخ سایش در الکل متیل نسبت به آب کمتر است. آن ها سه مکانیزم برای براده برداری در ماشینکاری اولتراسونیک را بیان کردند، مکانیزم اول سایش به دلیل نیروی برخورد می باشد، مکانیزم دوم لغزش ذرات ساینده روی سطح قطعه کار به دلیل نیروی برخورد می باشد و مکانیزم سوم براده برداری به دلیل انرژی اولتراسونیک می باشد. مقیاس براده برداری از مکانیزم ۱ به ۳ کاهش می یابد. آن ها اظهار داشتند که در مکانیزم براده برداری نوع سوم، براده برداری فقط به خاطر واکنش های مکانیکی نیست، بلکه می تواند به خاطر واکنش های شیمیایی بین ذارت ساینده و قطعه کار نیز باشد. آن ها در نتایج خود بیان کردند که در مکانیزم نوع سوم می توان به صافی سطح نانومتری دست یافت، بنابراین برای افزایش صافی سطح در فرایند ماشینکاری اولتراسونیک باید طوری عمل شود که براده برداری با مکانیزم سوم از طریق جلوگیری از تولید حفره ها انجام شود. [۱۳]

Zhang و همکارانش به این نتیجه رسیدند که بارهای زیاد مقدار ارتعاش نوک ابزار را کاهش می‌دهد و زمان تماس را طولانی می‌کند. همچنین اگر مقدار بار استاتیکی از یک حد مشخص تجاوز کند، ابزار به خوبی ارتعاش نمی‌کند و براده نمی‌تواند به طور موثر بیرون ریخته شود. در سرامیک‌های پیشرفته مانند منیزیم تثبیت شده با زیرکونیوم و آلومینیوم، با افزایش بار استاتیکی نرخ براده برداری نیز افزایش می‌یابد.[۱۴].