

مطالعه و بررسی مکانیزم فرآیند کوبش اولتراسونیک و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات فلزی

مهدی وحدتی^{۱*}، پوریا پوزش^۲

^۱استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲دانش آموخته کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

*مسئول مکاتبات: vahdati@shahroodut.ac.ir

واژگان کلیدی

کوبش اولتراسونیک
خواص مکانیکی
خستگی
تنش پسماند
خواص متالورژیکی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

چکیده

فرآیند کوبش اولتراسونیک، روشی جدید برای بهبود خواص فلز جوش و افزایش عمر خستگی سازه‌ها می‌باشد. فرآیند کوبش اولتراسونیک با اعمال ضربات مکانیکی ناشی از ارتعاشات فراصوت، باعث بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی سطوح قطعات فلزی می‌شود. فرکانس ارتعاش برای فرآیند کوبش اولتراسونیک در بازه ۲۰ الی ۴۰ کیلوهرتز قرار دارد. تأثیر عمده این فرآیند، افزایش استحکام خستگی مقاطع جوش داده شده تحت بارگذاری دینامیکی می‌باشد. کوبش اولتراسونیک با اعمال تنش‌های پسماند فشاری و با حذف و کاهش تنش‌های پسماند کششی، باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک شده و با بستن دهانه ترک‌های سطحی موجود در سطوح فلزات باعث افزایش طول عمر قطعات خواهد شد. بنابراین هر نیروی خارجی که سبب تخریب قطعه می‌شود، ابتدا باید بر تنش‌های پسماند فشاری غلبه کند. همین موضوع سبب طولانی‌تر شدن عمر خستگی قطعه مورد نظر خواهد شد. در این مقاله، مکانیزم فرآیند کوبش اولتراسونیک و نقش آن در بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

۱ مقدمه

فرآیند کوبش اولتراسونیک (UPT)^۱، روشی جدید برای بهبود خواص فلز جوش و افزایش عمر خستگی سازه‌ها می‌باشد. در این فرآیند با اعمال ضربات ارتعاشی با فرکانس بالا و دامنه کوتاه، اصلاحاتی از قبیل ایجاد تغییر شکل پلاستیک، اعمال تنش‌های پسماند فشاری و بسته شدن دهانه ترک‌های سطحی انجام می‌شود و در نهایت منتج به افزایش استحکام خستگی و افزایش عمر سازه می‌گردد [۱].

همچنین، این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های کار سرد بر روی فلزات می‌باشد. استاتیکوف اصول فرآیند چکش کاری اولتراسونیک و مکانیزم آن را ارائه کرده است و چکش کاری اولتراسونیک را به عنوان یکی از مناسب‌ترین تکنولوژی‌های افزایش استحکام خستگی و ایجاد تغییر شکل پلاستیک معرفی نموده است [۲].

از جمله کاربردهای صنعتی این فرآیند می‌توان به صنایع هوا فضا [۳]، صنایع دریایی و کشتی رانی [۴-۶]، صنایع خودرو [۷] و صنایع راه آهن [۸] اشاره کرد که در تمام صنایع مذکور موادی با استحکام بالا، عمر خستگی زیاد و مقاوم در برابر سایش مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این، فرآیند کوبش اولتراسونیک می‌تواند موجب کاهش تمرکز تنش در مقاطع سازه‌های جوشی، شود [۹].

در حین فرآیند، لایه نازک نانوکریستالی تشکیل می‌شود و در ادامه، تنش پسماند فشاری جایگزین تنش پسماند کششی خواهد شد. این تغییرات

موجب جلوگیری و یا تأخیر رشد ترک در سطح قطعه مورد نظر می‌شوند [۱۰]. فرکانس ارتعاش برای فرآیند کوبش اولتراسونیک در بازه ۲۰ الی ۴۰ کیلوهرتز می‌باشد. این میزان فرکانس، کوبش اولتراسونیک را به یک روش کم سر و صدا تبدیل کرده است. همچنین مدت زمان عملیات در فرآیند کوبش اولتراسونیک بسیار کوتاه‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد. پیون و همکاران [۱۱] فرآیند کوبش اولتراسونیک را برای فولاد ابزار D2 که در تیغه‌های قیچی نورد سرد مورد استفاده قرار می‌گیرند، انجام دادند. با بهبود خواص مکانیکی، طول عمر تیغه‌های قیچی از ۶۰ درصد به ۱۷۰ درصد افزایش یافت.

همچنین آمانوف و همکاران [۱۲] فرآیند کوبش اولتراسونیک را برای آلیاژ منیزیم AZ91D انجام دادند که به کاهش ۲۳ درصد اصطکاک و افزایش سختی از ۲۳۰ ویکرز به ۲۹۵ ویکرز در عمق ۱۰۰ میکرومتر از سطح منتج شد. برخی از مزایای فرآیند کوبش اولتراسونیک عبارتند از: بهبود خواص مکانیکی مواد، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مقرون به صرفه بودن، جابجایی آسان به دلیل وزن کم تجهیزات، قابلیت انجام بر روی انواع مواد با مشخصات هندسی و ابعادی متفاوت، قابلیت نصب و اجرا بر روی ماشین‌های تجاری، بازده زیاد و عدم نیاز به فرآیندهای تکمیلی نظیر عملیات حرارتی و تف جوشی.

هدف از این پژوهش، مروری بر تحقیقات نظری و تجربی در زمینه فرآیند کوبش اولتراسونیک و ارائه نتایج به دست آمده در رابطه با تأثیر این فرآیند بر خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات می‌باشد.

¹Ultrasonic Peening Treatment

۲ اصول طراحی دستگاه کوبش اولتراسونیک

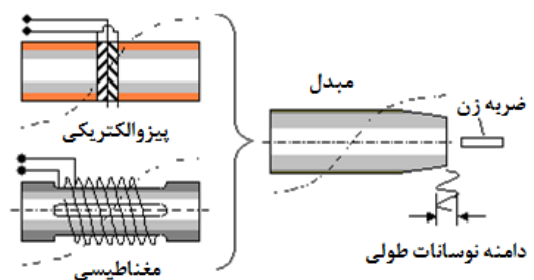
مکانیزم فرآیند کوبش اولتراسونیک، بهره‌گیری از فرکانس بالا و دامنه کوتاه ضربات ارتعاشی جهت اعمال به سطح قطعه‌کار می‌باشد. شکل ۱، ساختمان کلی دستگاه کوبش اولتراسونیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختمان کلی دستگاه کوبش اولتراسونیک [۹]

یک دستگاه کوبش اولتراسونیک معمولاً شامل یک منبع تغذیه با توان ۲۰۰ الی ۵۰۰ وات می‌باشد. این منبع تغذیه می‌تواند جریان الکتریکی با توان، فرکانس و ولتاژ مورد نیاز را تولید کند. از یک مبدل پیزوالکتریکی یا مغناطیسی برای تبدیل الکتریسیته تولید شده توسط منبع تغذیه به نوسانات مکانیکی با فرکانس بالا استفاده می‌شود.

دستگاه کوبش اولتراسونیک دارای یک متمرکز کننده می‌باشد که انرژی ارتعاشی مبدل را به دماغه ابزار منتقل می‌کند. یک کیت^۱ کامپیوتری، انرژی منتقل شده به قطعه را کنترل کرده و می‌تواند ابزار مرتعش را در وضعیت رزونانس^۲ (تشدید) نگه دارد. غالباً از یک سیستم خنک کاری برای جلوگیری از داغ شدن متمرکز کننده بر اثر کار کردن طولانی مدت استفاده می‌شود. مبدل می‌تواند از نوع پیزوالکتریکی یا مغناطیسی باشد. شکل ۲، تصویر شماتیک دو مبدل پیزوالکتریکی و مغناطیسی را نشان می‌دهد.

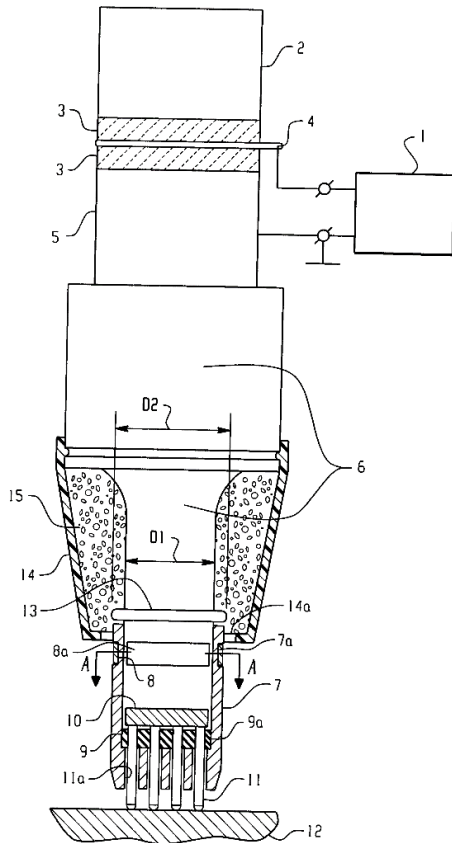


شکل ۲: مبدل پیزوالکتریکی و مغناطیسی [۱۴]

نوع پیزوالکتریکی نسبت به نوع مغناطیسی جدیدتر می‌باشد و دارای مزایایی همچون بازدهی بیشتر (۹۵-٪)، وزن کمتر تجهیزات و جابجایی آسان تر می‌باشد. در مبدل‌های از نوع مغناطیسی، به دلیل تولید گرما و اتلاف انرژی مبدل، استفاده از یک سیستم خنک کننده آبی الزامی می‌باشد که این امر موجب افزایش هزینه لازم برای خریداری تجهیزات و همچنین پیچیده‌تر و سنگین تر شدن دستگاه می‌شود. به دلیل مشکلات مذکور عمدتاً از دستگاه

هایی با مبدل پیزوالکتریکی استفاده می‌شود. در اکثر کاربردهای صنعتی، دستگاه کوبش اولتراسونیک دارای توانی در محدوده چند صد تا چند هزار وات، فرکانس کاری بین ۱۵ kHz تا ۱۰۰ kHz و دامنه ارتعاشی $10\ \mu m$ تا $40\ \mu m$ می‌باشد [۱۳].

شکل ۳، اجزای دستگاه کوبش اولتراسونیک را نشان می‌دهد که شامل اجزای متنوع و متفاوتی می‌باشد که در جدول ۱ فهرست شده است.

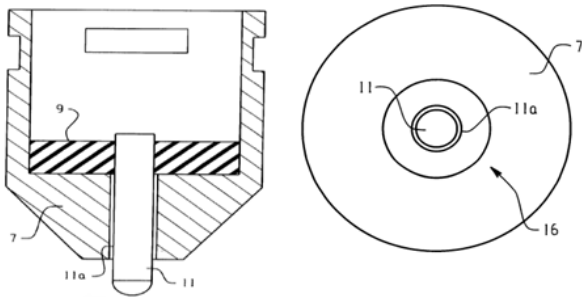


شکل ۳: دستگاه کوبش اولتراسونیک [۲۵]

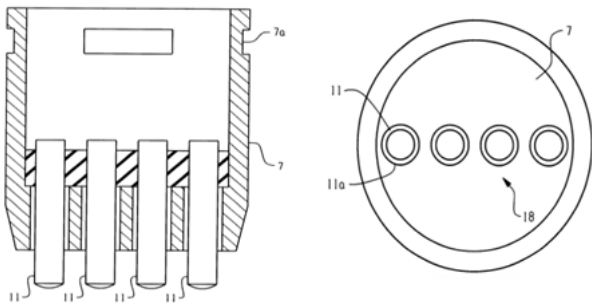
مطابق شکل ۳، یک مولد اولتراسونیک متصل به یک مبدل^۲ پیزوالکتریکی می‌باشد. مبدل شامل یک پشت بند، صفحات سرامیکی پیزوالکتریکی که در بین آن‌ها یک الکتروود رسانا قرار گرفته است و یک قطعه جفت شونده در جلوی آن قرار دارد. مبدل پیزوالکتریکی سیگنال الکتریکی را به نوسانات مکانیکی تبدیل می‌کند. یک متمرکز کننده به مبدل اضافه شده است. متمرکز کننده یک سر ضربه‌ای با سطح مقطع کوچکتر در انتها دارد و شامل یک نگهدارنده شکاف دار مجهز به یک فنر مسطح می‌باشد. یک قطعه نگهدارنده از جنس الاستومر نیز بر روی شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. یک صفحه مستحکم نیز در زیر متمرکز کننده قرار گرفته که به انتهای آن متصل است که این اتصال می‌تواند به صورت رزوه باشد. پین‌ها در قطعه الاستومری در یک حفره نگه داشته می‌شوند. این حفره‌ها در قطعه الاستومری دارای ابعادی نسبتاً کوچکتر از ابعاد پین‌ها می‌باشند که برای نگهداری پین‌ها حین فرآیند کوبش اولتراسونیک مناسب هستند. انتهای نیمگروی شکل پین می‌تواند با قطعه کار تماس پیدا کند. پوششی از جنس پلاستیک بر روی متمرکزکننده قرار گرفته است. همچنین از یک سیال مناسب به منظور فرآیند خنک کاری و روانکاری استفاده می‌شود.

¹Kit ²Resonance ³Transducer

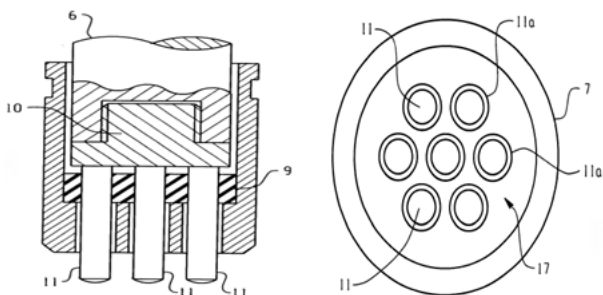
شکل ۴، یک سری تک پینه را نشان می‌دهد که عموماً برای انجام فرآیند بر روی سطوحی که دسترسی به آنها سخت است (حفره‌ها یا جوش‌های مقطعی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۵، یک سری تک ردیفه را نشان می‌دهد که برای مقطعی که دارای جوش انگشتی می‌باشند، استفاده می‌شود. شکل ۶، یک سری چند پینه را نشان می‌دهد که اساساً برای انجام فرآیند بر روی سطوح مسطح یا سطوحی با شعاع انحنا زیاد ($R = 100 \text{ mm}$) به کار می‌رود.



شکل ۴: سری تک پینه [۲۵]



شکل ۵: سری یک ردیفه [۲۵]



شکل ۶: سری چند پینه [۲۵]

۳ شبیه سازی فرآیند کوبش اولتراسونیک

شکل ۷، مدل سازی نوسانات و ضربات حاصل از فرآیند کوبش اولتراسونیک را نشان می‌دهد که توسط استاتیکوف [۲] ارائه شده است. با توجه به شکل ۷، دوره تناوب ضربات وارد شده (T_{im})، شامل مدت زمان وارد شدن ضربه (t_1) و فاصله زمانی بین دو ضربه (t_2) می‌شود. $(t_1/T_{im} = (0.1 - 0.3))$. مدت زمان ضربات اولتراسونیک در محدوده چند صد میکرو ثانیه تا چند میلی ثانیه قرار دارد. f_{im} نشان دهنده فرکانس ضربه ($f_{im} = (120 - 100) \text{ Hz}$) و f_{ul} نشان دهنده فرکانس نوسانات اولتراسونیک می‌باشد ($f_{ul} = (27 - 44) \text{ kHz}$).

جدول ۱: شماره و نام اجزای دستگاه کوبش اولتراسونیک (شکل ۳)

شماره قطعه	نام قطعه
۱	مولد اولتراسونیک
۲	پشت بند
۳	پیزوالکتریک
۴	الکتروود
۵	جفت شونده
۶	متمركز کننده
۷	نگهدارنده
۸	فنر
۹	حلقه الاستومری
۱۰	صفحه
۱۱	پین
۱۲	قطعه کار
۱۳	فلنج اتصالی
۱۴	پوشش پلاستیکی
۱۵	سیال

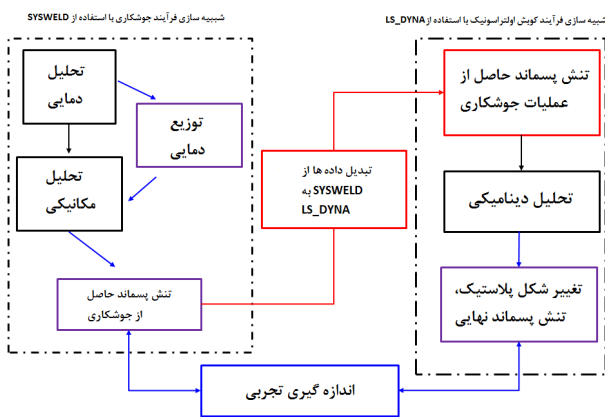
سری‌ها^۱ (شامل: نگهدارنده، پین‌ها، و الاستومر نگهدارنده) ترجیحاً قابل جدا شدن هستند. این امر موجب می‌شود که بتوان از سری‌هایی با ابعاد متفاوت استفاده نمود که با آرایش‌های مختلفی چیده می‌شود: تک پینه، یک ردیفه، و چند پینه (شکل‌های ۴ الی ۶). سری در انتهای متمركز کننده با کمک فنری با ابعاد تقریبی ۵ میلی‌متر نگهداری می‌شود. فنر در حفره ای که دارای عمق ۵/۵ میلی‌متر و عرض ۶ میلی‌متر است، قرار می‌گیرد. در نتیجه، فنر و همچنین سری در انتهای متمركز کننده موقعیت دهی می‌شود. سری همچنین به صورت آزاد به دور محور طولی‌اش دوران می‌کند. به این منظور، قطر داخلی نگهدارنده به اندازه ۲/۵ میلی‌متر از DI بزرگتر است. این امر، همچنین به سری اجازه می‌دهد، هنگامی که فنر خارج شده است، آزادانه در انتهای متمركز کننده بلغزد.

در پایه سری‌های قابل تعویض، حفره‌هایی وجود دارند که با تعداد و اندازه پین‌های مورد نظر مطابقت دارند. پین‌ها نیز آزادانه درون این حفره‌ها می‌لغزند. قطر این حفره‌ها از قطر پین‌ها به اندازه ۱/۱ تا ۲/۲ میلی‌متر بزرگتر است.

بین پین و انتهای متمركز کننده صفحه‌ای که از مواد با مقاومت بالا ساخته شده است، وجود دارد. صفحه از انتهای متمركز کننده (از جنس آلایزهای آلومینیوم یا تیتانیوم) در برابر تغییر شکل محافظت می‌کند و همچنین صفحه به صورت موثرتری انرژی را به پین‌ها انتقال می‌دهد تا مقدار گرمای اضافی تولیدی کاهش یابد. حلقه الاستومری نگهدارنده از بیرون افتادن پین‌ها از نگهدارنده در حین استفاده از دستگاه جلوگیری می‌کند. پین‌ها در حفره‌های حلقه قرار دارند. حفره‌های موجود در حلقه دارای قطر کمی کوچکتر از قطر پین‌ها هستند تا از بیرون افتادن پین‌ها حین فرآیند کوبش اولتراسونیک جلوگیری کنند. همان‌طور که در طرح دستگاه می‌توان مشاهده کرد، نگهدارنده در معرض بار دینامیکی قابل توجهی قرار نگرفته است. بنابراین ترجیحاً از موادی با مقاومت کم مثل برنج یا فولاد زنگ نزن ساخته می‌شود. پین‌ها باید سختی و چقرمگی زیادی داشته باشند. برای مثال از غلطک‌های استوانه‌ای داخل بلبرینگ‌ها با قطر ۲/۵ تا حداکثر ۵ میلی‌متر می‌توان به عنوان پین استفاده نمود.

¹Heading

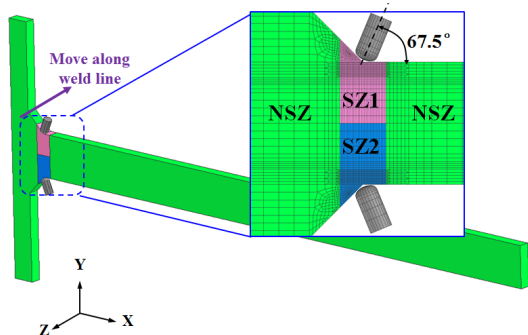
از نرم افزار LS-DYNA به مقادیر تنش پسماند تبدیل شدند (شکل ۸).



شکل ۸: فلوجارت شبیه سازی فرآیندهای جوشکاری و کوبش اولتراسونیک [۲۶]

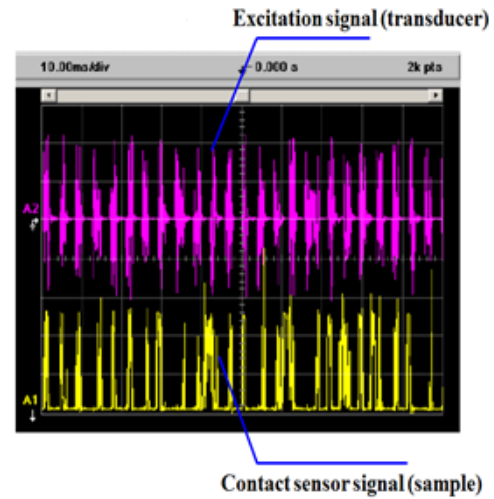
پس از شبیه سازی فرآیند جوشکاری با استفاده از SYSWELD، نتایج به دست آمده شامل اطلاعات مربوط به المانها، توزیع تنش پسماند در مقاطع جوش داده شده و تغییر شکل پلاستیک، در نرم افزار LS-DYNA وارد خواهند شد. اندازه شعاع دماغه ابزار ضربه زن ۳ میلی متر و با بدنه الاستیک مدل سازی می شود که دارای مدول الاستیک برابر با ۲۰۶ GPa، ضریب پواسون ۰/۳ و جرمی به اندازه ۱/۵ گرم می باشد [۲۷]. پین ها با زاویه ۶۷/۵ درجه نسبت به سطح قطعه کار قرار می گیرند. طبق رابطه (۲)، با در نظر گرفتن فرکانس ۲۷ kHz و دامنه ارتعاش ۳۰ میکرون تحت شرایط بارگذاری، سرعت ضربات وارد شده ۵ متر بر ثانیه محاسبه خواهد شد.

پین ها به هر نقطه مشخص از سطح قطعه کار، ۳۰ مرتبه ضربه وارد خواهند کرد که این تعداد ضربه برابر با یک ضربه اولتراسونیک خواهد بود. به منظور ایجاد سطحی صاف و یکنواخت پس از هر ضربه اولتراسونیک، پین به اندازه ۰/۴ میلی متر در امتداد خط جوش جابجا خواهد شد. این مقدار جابجایی منجر به ایجاد حداقل چهار منطقه همپوشانی شده از ضربات عملی توسط پین ها خواهد شد. ترتیب انجام فرآیند بر روی مقاطع به این صورت می باشد که ابتدا سطوح بالایی جوش و سپس سطوح پایینی جوش اصلاح خواهند شد. فرض می شود که جنس مواد به کار رفته در جوش تابع رفتار سختی سینماتیک خطی باشند. مناطق اصلاح شده (SZ) اطراف جوش در شکل ۹ مشخص شده اند.

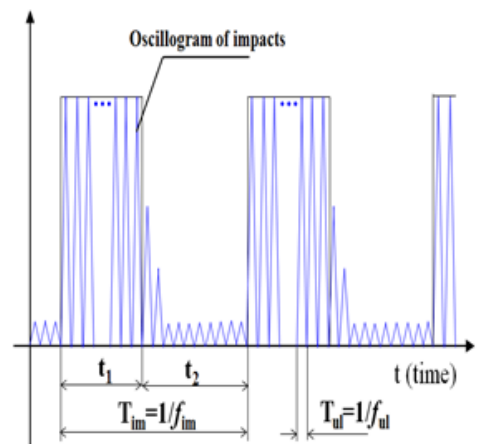


شکل ۹: مدل المان محدود فرآیند کوبش اولتراسونیک [۲۶]

به منظور جلوگیری از ایجاد نوسانات باقیمانده پس از فرآیند که ممکن است منجر به ایجاد خطا در محاسبات عددی شود، محاسبات مربوط به



الف) تصویر سیگنال اسکوپ از نوسانات مبدل (شکل بالا) و ضربات اولتراسونیک (شکل پایین)



ب) مدلسازی ضربات اولتراسونیک

شکل ۷: مدل ارائه شده توسط استاتینکوف [۲]

نوسانات پین در فرکانس ۲۷ kHz که عمدتاً منجر به تغییر شکل پلاستیک می شود، حدود ۳۰ مرتبه در یک تماس یک میلی ثانیه ای تکرار خواهد شد. برای ایجاد مدل المان محدود از فرآیند کوبش اولتراسونیک، دانستن سرعت ضربات وارد شده توسط پین ضروری است. می توان فرض کرد که سرعت تمامی ضربات اولتراسونیک وارد شده به سطح جسم یکسان است و یک سرعت میانگین برای ضربات عملی در نظر گرفت که این سرعت میانگین به عنوان ماکزیمم سرعت اولیه موج بر ۱ در نظر گرفته می شود. رابطه (۱)، موج هارمونیک سینوسی تولید شده توسط مبدل و رابطه (۲)، ماکزیمم سرعت اولیه را نشان می دهد.

$$x(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$V_{\max} = 2\pi fA \quad (2)$$

متغیر A ، ماکزیمم دامنه جابجایی در انتهای موج بر و متغیر f ، فرکانس نوسانات اولتراسونیک در فرآیند کوبش اولتراسونیک را نشان می دهد.

یوان و همکاران [۲۶]، فرآیند کوبش اولتراسونیک برای مقاطع جوش داده شده و تأثیر آن بر عمر خستگی را مورد بررسی و مدل سازی قرار دادند. بدین صورت که ابتدا فرآیند شبیه سازی حرارتی-مکانیکی پروسه جوشکاری با استفاده از نرم افزار SYSWELD صورت گرفت و سپس نتایج با استفاده

¹Waveguide ²Softening Zone

میرایی مواد در مدل مورد نظر به صورت زیر خواهد بود:

$$C = \alpha M = 2\omega_0 \xi M \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\sqrt{2T}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

در روابط فوق، C ضریب میرایی، M ماتریس جرم، α ضریب رایلی^۱، ω_0 کمترین فرکانس طبیعی، ξ نسبت میرایی متناظر، E مدول الاستیک، T و ρ به ترتیب چگالی و ضخامت صفحه مورد نظر می‌باشند.

۴ تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک بر عمر خستگی مواد

مهم‌ترین مزیت فرآیند کوبش اولتراسونیک، تأثیر آن بر خواص خستگی مواد می‌باشد. تحقیقات و مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارتباط بین فرآیند کوبش اولتراسونیک و پدیده خستگی و پارامترهای مربوط به آن صورت گرفته است. در این فرآیند اعمال تغییر شکل پلاستیک بر لایه‌های سطحی، موجب بهبود صافی سطح و افزایش تنش‌های فشاری پسماند در قطعه مورد نظر می‌شود. بنابراین هر نیروی خارجی که سبب تخریب قطعه می‌شود، ابتدا باید بر تنش‌های پسماند فشاری غلبه کند. همین موضوع سبب طولانی‌تر شدن عمر قطعه مورد نظر خواهد شد. در سال ۱۹۷۰ آقای استاتیکوف برای اولین بار از فرآیند کوبش اولتراسونیک برای مقاطع جوش داده شده و ماشینکاری شده استفاده کرد و تغییر شکل پلاستیک بر روی سطح قطعه ایجاد نمود. هاگسن و همکاران [۱۵] گزارش داده‌اند که با انجام فرآیندهای پوشش دهی با استفاده از جوشکاری TIG و کوبش اولتراسونیک به صورت ترکیبی بر روی فولاد مقاوم می‌توان حدود ۱۳۵ درصد عمر خستگی آن را افزایش داد. روی و همکاران [۱۶] تحلیلی تجربی بر روی فرآیند کوبش اولتراسونیک انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که عمر خستگی می‌تواند به اندازه ۸ برابر افزایش یابد. تروفیاکوف و همکاران [۱۷] تحلیلی کاربردی در زمینه تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک بر روی مقاومت در برابر خستگی مقاطع جوش داده شده انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که فرآیند کوبش اولتراسونیک می‌تواند مقاومت در برابر خستگی را از ۱۷۸ MPa به ۳۵۱ MPa در ۲ میلیون سیکل کاری افزایش دهد. با این وجود، تعداد اندکی نتایج متناقض گزارش داده شده‌اند. به عنوان مثال، برای آلومینیوم 2024-T3 فرآیند کوبش اولتراسونیک موجب کاهش عمر خستگی شد، اما از سوی دیگر، تأثیرات مثبتی نظیر افزایش میکروسختی و تنش‌های فشاری پسماند را به همراه داشت [۱۸].

فرآیند کوبش اولتراسونیک به عنوان یک روش مؤثر برای سازه‌های فولادی جوش داده شده که تحت بارگذاری دینامیکی با دامنه متغیر هستند، شناخته شده است. عباسی و همکاران [۱۹] با بررسی فرآیند کوبش اولتراسونیک بر روی فولاد گرافیتی GSH48 به این نتیجه رسیدند که فناوری کوبش اولتراسونیک با به تأخیر انداختن شروع و انتشار ترک‌های حاصل از خستگی سبب افزایش عمر خستگی می‌شود. نتایج آزمایش خستگی صورت گرفته برای فولاد گرافیتی GSH48 قبل و بعد از انجام فرآیند در جدول ۲،

ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج آزمایش خستگی بر روی فولاد گرافیتی GSH48 [۱۹]

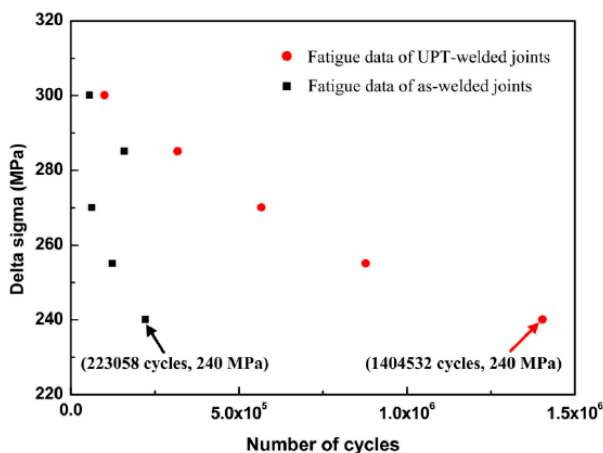
شرایط نمونه	تعداد دوران نمونه (RPM)	میزان تنظیم نیرو (N)	تعداد پاس انجام فرآیند UPT
قبل UPT	۲۹۸۷۲	۲۰۰	۰
بعد UPT	۱۷۹۴۷۵	۲۰۰	۱
بعد UPT	۱۸۵۶۰۷	۲۰۰	۲
قبل UPT	۱۴۳۰۱	۳۰۰	۰
بعد UPT	۷۴۷۹۵	۳۰۰	۱
بعد UPT	۸۰۲۳۳	۳۰۰	۲

رابطه بین تغییرات تنش نامی^۲ ($\Delta\sigma$) و عمر خستگی (N) به شرح زیر است. σ_{\max} و σ_{\min} به ترتیب نشان دهنده تنش نامی ماکزیمم و تنش نامی مینیمم در یک سیکل کاری می‌باشند.

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (6)$$

ژائو و همکاران [۱۰] تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک را بر روی عمر خستگی مقاطع جوش داده شده بررسی نمودند که نتایج آن در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش میزان تنش، تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک بر افزایش طول عمر خستگی، بیشتر خواهد شد.

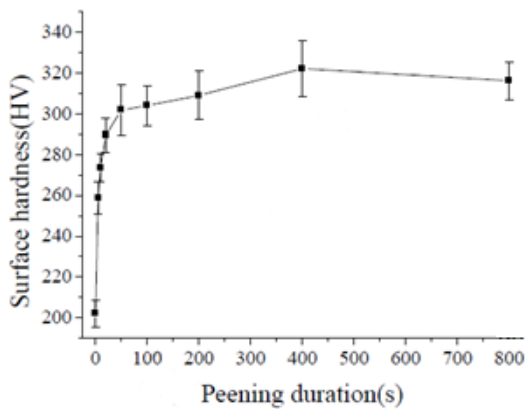


شکل ۱۰: رابطه میان میزان تنش و عمر خستگی در فرآیند کوبش اولتراسونیک [۱۰]. تروفیاکوف و همکاران [۲۰]، افزایش مقاومت در برابر خستگی برای جوش‌های لب به لب پس از فرآیند کوبش اولتراسونیک را ۵۰ تا ۲۰۰ درصد گزارش کرده‌اند.

۵ تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک بر سختی مواد

فرآیند کوبش اولتراسونیک تأثیر قابل توجهی بر افزایش سختی و کاهش خوردگی در مواد دارد. دو پدیده تنش فشاری پسماند و تشکیل نانوساختار موجب افزایش سختی و مقاومت در برابر خوردگی می‌شوند [۲۱]. هنگامی که کوبش اولتراسونیک اعمال می‌شود، تغییر شکل پلاستیک موجب افزایش حرکت و تراکم نابجایی‌های ساختار ماده خواهد شد.

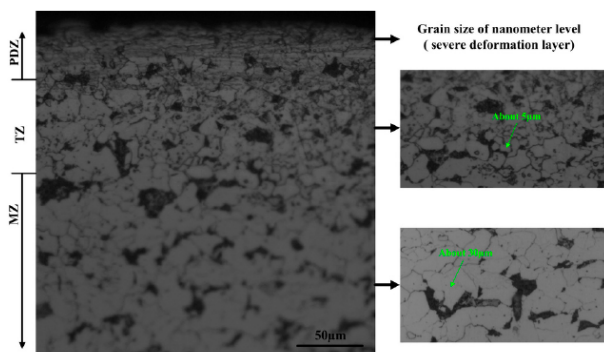
¹Rayleigh ²Nominal Stress



شکل ۱۲: تأثیر مدت زمان انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک بر سختی تیتانیوم خالص [۲۳]

۶ تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک بر میکروساختار مواد

با انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک بر روی نواحی جوش داده شده، ساختار ماده به سه ناحیه تقسیم خواهد شد: ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل پلاستیک شده (PDZ)^۲، ناحیه گذار (TZ)^۳ و ناحیه زمینه (MZ)^۴. در بین این نواحی، ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل پلاستیک شده از دانه بندی مرغوب با جهت گیری-های مختلف برخوردار می‌باشد. میانگین ابعاد دانه‌ها در این ناحیه در حد نانومتر می‌باشد. همچنین این ناحیه به طور مستقیم تحت تأثیر ضربات ناشی از انجام فرآیند قرار می‌گیرد و به همین دلیل دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. شکل ۱۳، میکروساختار فلز پس از انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک را نشان می‌دهد.



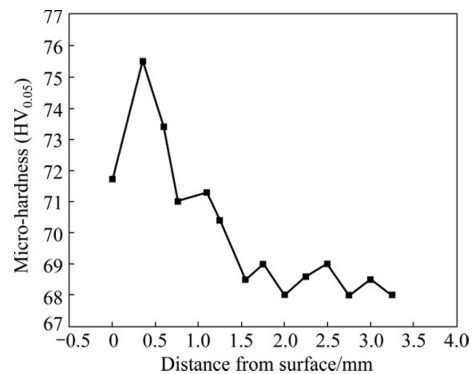
شکل ۱۳: میکروساختار و تغییرات لایه ای پس از انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک [۱۰]

با توجه به شکل ۱۳، ناحیه گذار بین دو ناحیه دیگر قرار داشته و اندازه دانه‌ها با نزدیک شدن به ناحیه زمینه، بزرگتر خواهد شد. به دلیل ایجاد تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های سطحی و کوچک شدن اندازه دانه بندی در این ناحیه پس از انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک، مقاومت و سختی مواد افزایش خواهد یافت [۱۰].

فنگ و همکاران [۲۴] تأثیر تعداد دفعات انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک را بر روی میکروساختار فولاد S355 مورد بررسی قرار دادند.

هی و همکاران [۲۲] به بررسی تأثیرات فرآیند کوبش اولتراسونیک بر روی خواص آلیاژ آلومینیوم 5A06 پرداخته‌اند. آن‌ها با انجام آزمایش قبل از انجام فرآیند به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با فلز پایه (آلیاژ آلومینیوم 5A06)، میزان سختی در ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)^۱، به ترتیب ۹/۲ و ۱۲/۶ درصد کاهش پیدا کرده است.

هی و همکاران [۲۲] با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش سختی بر روی آلیاژ آلومینیوم 5A06 به این نتیجه رسیدند که فرآیند کوبش اولتراسونیک موجب افزایش سختی فلز مورد نظر می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: تغییرات میکروسختی پس از انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک [۲۲]

با توجه به شکل ۱۱، قطعاتی که فرآیند کوبش اولتراسونیک بر روی آن‌ها صورت گرفته است، در سطح از سختی بیشتری نسبت به دیگر قطعات برخوردار خواهند بود. با دور شدن از سطح و افزایش عمق، اختلاف میزان سختی برای قطعات مختلف به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. عباسی و همکاران [۱۹] تأثیر فرآیند کوبش اولتراسونیک بر سختی سطح فولاد گرافیتی GSH48 را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتیجه آزمایش‌های آن‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده است.

با توجه به جدول ۳، سختی در سطح نمونه از ۳۴۵ ویکرز به ۵۴۲ ویکرز افزایش یافته است و بیشترین میزان سختی در سطح قطعه می‌باشد و با دور شدن از سطح قطعه کار تأثیر فرآیند بر سختی کاهش خواهد یافت.

ژو و همکاران [۲۳]، تأثیر مدت زمان انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک را بر سختی سطح تیتانیوم خالص مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش آن‌ها در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۲، میزان سختی در سطح تیتانیوم خالص با افزایش مدت زمان فرآیند تا ۴۰۰ ثانیه، افزایش می‌یابد. با طولانی‌تر شدن فرآیند، میزان سختی در سطح فلز تقریباً بدون تغییر و ثابت خواهد بود. فرآیند کوبش اولتراسونیک با ایجاد تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های سطحی و با اعمال کارسختی موجب افزایش سختی در سطح قطعه کار می‌شود.

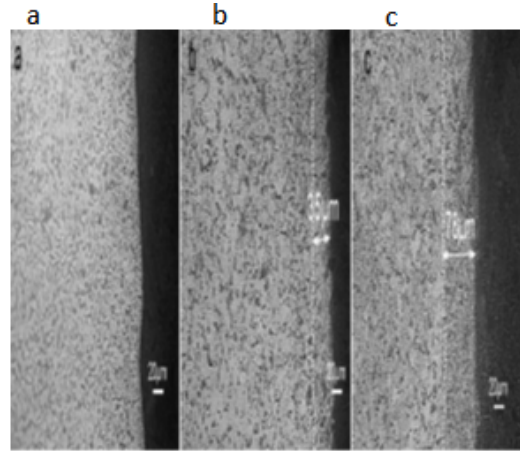
جدول ۳: نتایج آزمایش سختی بر روی فولاد گرافیتی GSH48 [۱۹]

فاصله از سطح (mm)	قبل از فرآیند (HV)	پس از فرآیند (HV)
۰	۳۴۵	۵۴۲
۰/۰۵	۳۰۴	۵۰۱
۰/۱۰	۲۹۴	۳۸۹
۰/۱۵	۲۸۶	۳۳۷
۰/۲۰	۲۶۲	۲۶۹

¹Heat Affected Zone ²Plastic Deformation Zone ³Transition Zone ⁴Matrix Zone

- [2] E. Statnikov, Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment, International Institute of Welding, IIW Document XIII-2004-04, 2004.
- [3] M.P. Nascimento, R.C. Souza, W.L. Pigatin, H.J.C. Voorwald, Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel, *Int. J. Fatigue*, Vol. 23, pp. 607-618, 2003.
- [4] K. Kirkhope, R. Bell, L. Caron, R. Basu, K.-T. Ma, Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2: application to ship structures, *Mar. Struct.*, Vol. 12, No. 7, pp. 477-496, 1999.
- [5] T. Deguchi, M. Mouri, J. Hara, D. Kano, T. Shimoda, F. Inamura, T. Fukuoka, K. Koshio, Fatigue strength improvement for ship structures by Ultrasonic Peening, *J. Mar. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 3, pp. 360-369, 2012.
- [6] L.L. Martinez, Z. Barsoum, A. Paradowska, fatigue life extension of offshore installations, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, pp. 9-20, 2012.
- [7] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, Application of Ultrasonic Peening for Fatigue Life Improvement of Automotive Welded Wheels, International Institute of Welding, IIW Document XIII-2075-05, 2005.
- [8] S. Maddox, M.J. Doré, S. Smith, A Case Study Of The Use Of Ultrasonic Peening For Upgrading A Welded Steel Structure, *Weld World*, Vol. 55, No. 9-10, pp. 56-67, 2011.
- [9] M. Malaki, H. Ding, A review of ultrasonic peening treatment, *Mater. Des.*, Vol. 87, pp. 1072-1086, 2015.
- [10] X. Zhao, M. Wang, Z. Zhang, and Y. Liu. The Effect of Ultrasonic Peening Treatment on Fatigue Performance of Welded Joints, *Materials*, Vol. 471, 2016.
- [11] Y.S. Pyoun, H.S. Kim, K.G.Son, G.H.Song, M.K.Kim, J.H.Kang, B.U.Choi, J.Park, I.H.Cho, C.S.Kim, J.H.Park, J.Kinney, Development of D2 Tool Steel Trimming Knives with Nanoscale Microstructure, *Proceedings of the AISTech*, Vol. 2, pp. 465-468, 2005.
- [12] A. Amanov, O. Penkov, Y. S. Pyun, D. E. Kim, Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the tribological properties of AZ91D magnesium alloy, *Tribology International*, Vol. 54, pp. 106-113, 2012.
- [13] A. Abdullah, M. Malaki, A. Eskandari, Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening, *Mater. Des.*, Vol. 38, pp. 7-18, 2012.
- [14] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, L. Lobanov, V. Knysh, G. Prokopenko. Fatigue Life Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Peening, International Institute of Welding, 2010.
- [15] P. Haagensen, E. Statnikov, L. Lopez-Martinez, Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT), International Institute of Welding, IIW Doc. 13, pp. 1748-1798, 1998.
- [16] S. Roy, J.W. Fisher, B.T. Yen, Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT), *Int. J. Fatigue*, Vol. 25, No. 9, pp. 1239-1247, 2003.

نتیجه آزمایش‌های آن‌ها در شکل ۱۴ قابل مشاهده می‌باشد. در این شکل، تصاویری از ساختار نمونه مورد نظر قبل از انجام فرآیند (a)، پس از انجام یک سیکل از فرآیند (b) و پس از انجام سه سیکل از فرآیند (c) نشان داده شده است. خط سفید در تصاویر (b) و (c)، مرز ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل پلاستیک شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: میکروساختار فولاد S355 (a) قبل از انجام فرآیند UPT؛ (b) پس از انجام یک سیکل از فرآیند UPT و (c) پس از انجام سه سیکل از فرآیند UPT [۲۴]

با توجه به شکل ۱۴، عمق ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل پلاستیک شده است، برای یک سیکل از فرآیند و سه سیکل از فرآیند به ترتیب $35 \mu m$ و $78 \mu m$ می‌باشد و همچنین اندازه دانه بندی پس از سه سیکل اعمال فرآیند کوبش اولتراسونیک ریزتر از هنگامی است که یک سیکل از فرآیند اعمال شده باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تعداد دفعات اعمال فرآیند بر روی نمونه می‌تواند عمق ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل پلاستیک شده و همچنین اندازه دانه بندی را تغییر دهد.

۷ نتیجه گیری

در این مقاله، مکانیزم فرآیند کوبش اولتراسونیک و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات فلزی همچون: خستگی، سختی و میکروساختار مواد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعات فلزی پس از انجام فرآیند کوبش اولتراسونیک بهبود خواهد یافت. جایگزینی تنش پسماند فشاری با تنش پسماند کششی، اعمال تغییر شکل پلاستیک و حذف ریزترک‌های سطحی قطعات از جمله مهم‌ترین اثرات این فرآیند می‌باشد. کم سر و صدا بودن، کوتاه بودن مدت زمان انجام فرآیند، ارزان بودن نسبی تجهیزات، جابجایی آسان به دلیل سبک بودن تجهیزات و عدم نیاز به فرآیندهای اصلاحی نظیر تف جوشی و عملیات حرارتی از جمله مهم‌ترین مزایای این فرآیند می‌باشند.

مراجع

- [1] E. Statnikov, Guide for application of ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structures, *Life of Welded Structures*, IIW, Doc, 1999.

- [17] V. Trufiakov, E. Statnikov, P. Mikheev, A. Kuzmenko, The Efficiency of Ultrasonic Impact Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, International Institute of Welding, IIW Document, 13, pp. 1745-1798, 1998.
- [18] M. Castillo-Morales, A. Salas-Zamarripa, The effects of UIT in the fatigue life of Al 2024-T3, Key Eng. Mater, Vol. 449, pp. 15-22, 2010.
- [19] A. Abbasi, S. Amini, Gh. Shikhzade, Investigation of ultrasonic peening technology on the GSH48 graphite steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 29-36, 2016 (in Persian)
- [20] V.I. Tryfyakov, P.P. Mikheev, Y.F. Kudryavtsev and D.N. Reznik, Ultrasonic Impact Peening Treatment of welds and Its Effect on Fatigue Resistance in Air and Seawater, Off-shore Technology Conference, pp.183-193, 1993.
- [21] A. Cherif, Y. Pyoun, B. Scholtes, "Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) on Residual Stress State and Fatigue Strength of AISI 304", J. Mater. Eng. Perform, Vol. 19 (2), pp. 282-286, 2010.
- [22] Y.He, D.Wang, Y.Wang, H.Zhang, Correction of buckling distortion by ultrasonic shot peening treatment for 5A06 aluminum alloy welded structure, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, pp. 1531-1537, 2015.
- [23] L. Zhu, Y. Guan, Y. Wang, Z. Xie, J. Lin, J. Zhai, Influence of process parameters of ultrasonic shot peening on surface roughness and hydrophilicity of pure titanium, Surface and Coatings Technology, Volume 317, pp. 38-53, 2017.
- [24] Y. Feng, S. Hu, D. Wang, L. Cui, Formation of short crack and its effect on fatigue properties of ultrasonic peening treatment S355 steel, Materials & Design, Vol. 89, pp. 507-515, 2016.
- [25] G. L. Prokopenko, O. I. Kozlov, Device for ultrasonic peening of metals, US Patent No. 6467321 B2, 2002.
- [26] K.L. Yuan, Y.Sumu, Modelling of ultrasonic impact treatment (UIT) of welded joints and its effect on fatigue strength, Fracture and Structural Integrity, Vol. 34, pp. 476-486, 2015.
- [27] G. Le Quilliec, H.P. Lieurade, M. Bousseau, M. Drissi-Habti, G. Inglebert, P. Macquet, L. Jubin, Mechanics and modelling of high-frequency mechanical impact and its effect on fatigue, Weld World, Vol. 57.1, pp. 97-111, 2013.