

بررسی سمت و سوی کاربرد ارتعاشات توان بالای فراصوتی در فرایندهای

جوشکاری

وحید فرتاشوند استادیار دانشگاه الزهرا (س) V.fartashvand@alzahra.ac.ir	امیر عبدالله دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر amirah@aut.ac.ir	رضوان عابدینی* استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران rezvanabedini@iust.ac.ir	علی محمدی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر alimohammadi97@aut.ac.ir
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷			تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

چکیده

جوشکاری فراصوتی به عنوان یک فناوری نو در بسیاری از صنایع جایگزین روش‌های معمول اتصال نظیر جوشکاری، بریزینگ^۱، دوخت و ... شده است. در این فناوری انرژی فراصوتی توسط ترانسدیوسر^۲ (مبدل) فراصوتی تولید و از طریق بوستر^۳ و هورن^۴ به ناحیه اتصال منتقل می‌شود. انرژی فراصوتی در ناحیه اتصال منتشر و جذب شده و ایجاد حرارت می‌نماید. اعمال هم‌زمان نیرو / فشار و ایجاد حرارت موجب اتصال قطعات درگیر با یکدیگر می‌گردد. در این فرایند پارامترهای متعدد نظیر توان، فرکانس، نیرو / فشار، زمان، جنس و شکل مواد و ... بر خصوصیات اتصال و نمونه حاصل تأثیرگذار هستند. در این مقاله با هدف آشنایی محققان با اصول و کاربردهای پیرامون این فناوری، به مرور تحقیقات علمی و صنعتی در زمینه جوشکاری فراصوتی پرداخته شده است. با توجه به کاربرد عمده و مکانیزم‌های متفاوت تأثیرگذار، این مقاله به دو بخش اصلی جوشکاری فلزات و پلاستیک‌ها تقسیم‌بندی شده است. با توجه به اهمیت و کاربرد موضوع، اصول و روش‌های اعمال ارتعاشات فراصوتی، مکانیزم‌های متفاوت تأثیرگذاری فراصوت، پارامترهای فرایند اتصال فراصوتی و کاربردهای مهم این فناوری مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت دورنمایی از کاربرد ارتعاشات توان بالای فراصوتی در فناوری‌های نوین ساخت و اتصال در آینده صنعت ارائه شده است.

واژگان کلیدی: جوشکاری فراصوتی، پارامترهای فرایند، جوشکاری فلزات، جوشکاری پلاستیک، ارتعاشات مکانیکی

۱. مقدمه

امروزه در ساخت قطعات، روش‌هایی ارجحیت دارند که انرژی کمتری مصرف کنند و آلودگی کمتری داشته باشند (فناوری سبز). یکی از روش‌های متداول مونتاژ و تولید مجموعه‌های نهایی، استفاده از روش جوشکاری است که در انواع مختلف

برای اتصال قطعات در هندسه و جنس‌های متفاوت توسعه یافته است. هر فرایند جوشکاری دارای مزایا و معایبی بوده و دامنه کاربرد مشخصی دارد. به عنوان نمونه، روش جوشکاری با قوس الکتریکی و جوشکاری با گاز از روش‌های رایج هستند که در آنها انرژی زیادی مصرف شده و منطقه متأثر از حرارت جوشکاری موجب افت خواص مکانیکی اتصال می‌گردد [۱].

یکی از روش‌های نوین اتصال‌دهی استفاده از ارتعاشات فراصوت توان بالا برای جوشکاری قطعات است که برای مواد فلزی، پلاستیکی (ترموپلاستیک)، کامپوزیتی و الیاف پارچه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای توسعه این روش نوین می‌توان به سرعت بالا، مصرف انرژی کمتر، یکنواختی، تکرارپذیری، سبز بودن از نظر زیست‌محیطی، تمیز بودن و بدون داشتن پاشش در اطراف خط جوش، عدم نیاز به الکتروود و فیلر و گاز محافظ، امکان جوشکاری قطعات ناهمجنس، امکان اتصال قطعات با ضخامت‌های مختلف به یکدیگر (نازک به ضخیم) و قابلیت اتوماسیون اشاره نمود [۲]. این مزایا در کنار محدودیت‌های دیگر روش‌های جوشکاری، موجب استقبال محققان و صنعتگران از این فناوری شده و تحقیقات متعددی در این زمینه اجرا شده و یا در حال اجرا است.

با توجه به پیشینه نویسندگان در خصوص طراحی، ساخت و کاربرد سیستم‌های فراصوتی توان بالا و تحقیقات انجام شده در این زمینه کاربرد این فناوری در فرایندهای ساخت و تولید [۳-۵]، در این مقاله با توجه به اهمیت فناوری اتصال‌دهی فراصوتی در صنعت و جایگزینی این روش به جای روش‌های معمول مانند اتصال چسبی و اتصالات مکانیکی، به شرح علمی اصول فناوری فراصوت، دستگاه‌ها و تجهیزات جوشکاری مورد استفاده، مکانیزم‌های متفاوت جوشکاری پلاستیک‌ها و فلزات، معرفی پارامترهای مستقل و وابسته فرایند و وضعیت فعلی و آینده پیش روی آن در فرایندهای اتصال‌دهی صنعتی پرداخته شده است.

۲. تجهیزات جوشکاری فراصوتی

امواج فراصوت امواج الاستیک با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان یعنی ۲۰ کیلوهرتز هستند که از درون اجسام عبور و انرژی را منتقل می‌کنند [۶]. فناوری فراصوت توان بالا دارای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های پزشکی، بیولوژی و صنعتی است [۷-۹]. به‌طور کلی تجهیزات جوشکاری فراصوتی توان بالا را می‌توان به سه بخش الکترونیکی، مکانیکی و الکترومکانیکی تقسیم کرد.

بخش الکترونیکی شامل منبع تغذیه (یا ژنراتور) و مدارهای الکترونیکی است که به اصطلاح مغز مجموعه نامیده می‌شود. منبع تغذیه وظیفه تبدیل برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۲۲۰ ولت به جریان الکتریکی با فرکانس‌های بالا متناسب با فرکانس کاری دستگاه بین ۱۵ تا ۱۰۰ کیلوهرتز و ولتاژ بالا (حدود ۱۰۰۰ ولت) را دارد. علاوه‌براین یکی از ویژگی‌های برجسته منبع تغذیه استفاده از الگوریتم خود تنظیم برای شناسایی و تطبیق فرکانس خروجی منبع تغذیه با فرکانس کاری لحظه‌ای با مجموعه آکوستیکی در حال کار است. این الگوریتم برای جوشکاری پلاستیک‌ها مبتنی بر تشخیص فرکانس رزونانس (تشدید) و برای جوشکاری فلزات مبتنی بر شناسایی لحظه‌ای فرکانس آنتی‌رزونانس است. بر مبنای این الگوریتم، با گرفتن بازخورد از بخش الکترومکانیکی در حین کارکرد دستگاه، فرکانس جریان الکتریکی را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که سیستم همیشه در فرکانس تشدید یعنی بهترین حالت ارتعاشی کار کند. براساس نوع و محل استفاده دستگاه، مدار الکتریکی دیگری برای تنظیم زمان و انرژی جوشکاری وجود دارد [۱۰].

در شکل ۱ نمونه‌ای از یک منبع تغذیه فراصوت توسعه داده شده توسط تیم نویسندگان نشان داده شده است. منبع تغذیه شامل یک برد تغذیه و یک برد کنترل است. در منبع تغذیه‌های نوین استفاده از ریزپردازنده‌های الکترونیکی برای مقاصد نظیر کنترل اتوماتیک فرایند و پارامترهای آن به‌طور مثال خاموش کردن سیستم با بالا رفتن دمای کاری از یک حد معین، رواج یافته است.

برابر باشد. دامنه جابه‌جایی ایجاد شده به فرکانس مبدل و توان آن بستگی دارد و برای طرح‌های مختلف متفاوت است. در شکل ۲ تصویری از مبدل فراصوتی به همراه اجزای آن نشان داده شده است. در شکل ۳ طرح‌های مختلفی از ترانسدیوسرهای فراصوتی برای کاربردهای مختلف جوشکاری ساخته شده توسط نویسندگان ارائه شده است.



شکل ۱. منبع تغذیه‌ی فراصوت (توان ۱/۵ کیلووات و فرکانس

۵۰-۱۵ kHz)



شکل ۲. اجزای اصلی مبدل پیزوالکتریک فراصوتی



شکل ۳. طرح‌های مختلف مبدل پیزوالکتریک فراصوتی

بخش مکانیکی وظیفه دریافت انرژی آکوستیکی از ترانسدیوسر و انتقال آن به محل اتصال را بر عهده دارد که عموماً از دو قطعه بوستر و هورن تشکیل شده است. همچنین این بخش برای تنظیم (کاهش یا تقویت) دامنه ارتعاشی نیز مورد طراحی قرار می‌گیرد. بوستر معمولاً از آلیاژهای آلومینیوم (-Al7075 Ti6)، فولاد (Cr12) و تیتانیوم (Ti-6Al-4V و Ti-7Al)

بخش الکترومکانیکی، شامل ترانسدیوسر یا مبدل است که در اصطلاح قلب سیستم‌های فراصوت توان بالا است. مبدل وظیفه تبدیل جریان الکتریکی فرکانس بالا را به ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا بر عهده دارد. مبدل‌ها به دو دسته الکترومغناطیس (مگنتو استرکتیو^۵) و پیزوالکتریک تقسیم می‌شوند که امروزه اکثر آنها از نوع دوم یعنی پیزوالکتریک هستند، زیرا این دسته از مبدل‌ها بازده بالاتری دارند (۹۷٪-۹۰) [۱۱]. مبدل‌های پیزوالکتریک حالت ساندویچی داشته و از دو قطعه فلزی به نام‌های پشت‌بند و تطبیق، چند دیسک پیزوسرامیک و یک پیچ مرکزی تشکیل شده‌اند که این پیزوسرامیک‌ها توسط پیچ بین پشت‌بند و تطبیق تحت فشار قرار می‌گیرند تا یک پیش بار فشار معین روی آنها اعمال شود. قطعه پشت‌بند معمولاً از فولاد به دلیل خواص مکانیکی و قطعه تطبیق از آلیاژ آلومینیوم یا تیتانیوم به دلیل خواص آکوستیکی مناسب ساخته می‌شوند. پشت‌بند معمولاً چگالی بیشتری از تطبیق دارد تا انرژی و ارتعاشات بیشتر به سمت قطعه تطبیق هدایت شود [۱۲، ۱۳]. با اعمال ولتاژ الکتریکی از طریق الکتروود به دیسک‌های پیزوسرامیک، تغییر ابعاد در آنها متناسب با خاصیت پیزوالکتریسیته رخ داده و منجر به ایجاد جابه‌جایی مکانیکی می‌گردد. برای دستیابی به حداکثر دامنه جابه‌جایی مکانیکی، فرکانس جریان الکتریکی اعمالی به مبدل یعنی خروجی منبع تغذیه یا بخش الکتریکی باید با فرکانس تشدید مکانیکی مبدل



شکل ۵. بوسترهای پله‌ای فراصوتی

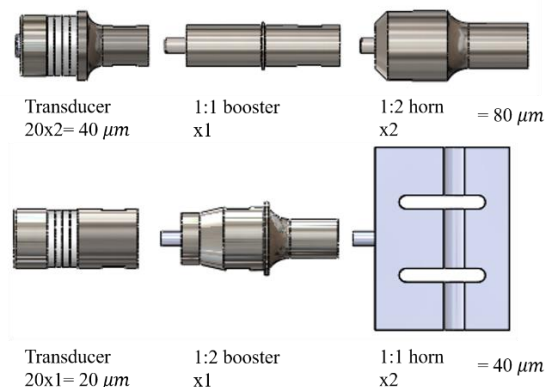
در کاربردهای مختلف فراصوت توان بالا از جنس‌های مختلفی برای ساخت هورن استفاده می‌شود. برای کاربردهای معمولی از آلیاژ آلومینیوم و برای کاربردهایی با فشار و سایش زیاد، از فولاد و آلیاژهای تیتانیوم استفاده می‌شود. هورن باید دارای مقاومت به سایش و مقاومت خستگی بالا و خواص آکوستیک مناسب باشد [۱۴]. در برخی موارد برای افزایش استحکام و مقاومت به خوردگی از پوشش‌های سخت در سطح تماس هورن استفاده می‌شود. در برخی موارد جوشکاری، هورن برای ایجاد فشار روی قطعاتی که باید به هم جوش بخورند، استفاده می‌شود. در شکل ۶ انواع هورن‌های فراصوتی ساخته شده توسط نویسندگان نشان داده شده است.



شکل ۶. انواع هورن‌های جوشکاری فراصوتی

به صورت کلی هورن‌های جوشکاری نقطه‌ای براساس شکل هندسی مطابق به سه دسته پله‌ای، نمایی و کاندوینال^۶ تقسیم می‌شوند. در نوع پله‌ای تغییر مقطع به یکباره صورت می‌گیرد و به همین علت تمرکز تنش زیاد است، ولی در این هورن‌ها می‌توان دامنه ارتعاشات را تا ۹ برابر افزایش داد.

4Mo ساخته می‌شود. بوستر با وظیفه تنظیم (تقویت) دامنه ارتعاشات به انتهای مبدل متصل می‌شود و با توجه به میزان کاهش یا افزایش سطح مقطع، دامنه ارتعاشات را به ترتیب افزایش یا کاهش می‌دهد (ضریب بزرگ‌نمایی). مقدار افزایش یا کاهش دامنه ارتعاشات، به نسبت مساحت انتها به ابتدای بوستر بستگی دارد. در بوسترهایی که مساحت سطح خروجی آنها که در تماس با هورن قرار می‌گیرد، نسبت به مساحت ورودی که در تماس با مبدل است، کوچکتر باشد دامنه ارتعاشات افزایش می‌یابد و برعکس. مفهوم افزایش دامنه توسط بوستر و هورن در شکل ۴ نشان داده شده است.



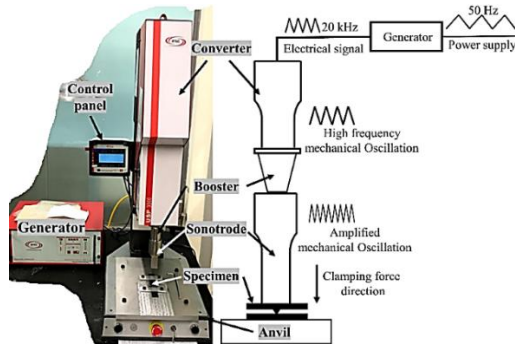
شکل ۴. افزایش دامنه ارتعاشات مبدل توسط بوستر و هورن

هورن قطعه‌ای است که وظیفه هدایت انرژی آکوستیکی را به محل اتصال داشته و به انتهای بوستر متصل می‌شود و در واقع نقش ابزار جوشکاری را بر عهده دارد. هورن‌ها بنابر کاربردی که دارند به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند. طول بوستر و هورن به اندازه‌ای است که فرکانس تشدید آنها با فرکانس تشدید مبدل یکسان باشد تا پس از اتصال به مبدل، کل مجموعه در فرکانس تشدید مبدل با حداکثر دامنه ارتعاش کند. در بوستر پله‌ای وجود دارد که در محل گره موج ایجاد شده است که در آنجا دامنه ارتعاش تقریباً صفر است و از این پله بوستر برای متصل کردن کل کلگی فراصوتی به بدنه دستگاه استفاده می‌شود. در شکل ۵ چند بوستر ساخته شده توسط نویسندگان از جنس‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۹. هورن مرکب فراصوتی در جوشکاری پلاستیک‌ها [۱۶]

دیگر اجزای مکانیکی دستگاه جوشکاری فراصوتی شامل سندان، فیکسچر، سامانه محرک (پنوماتیک یا الکتریکی) و سازه دستگاه هستند. در شکل ۱۰ اجزای اصلی دستگاه جوشکاری فراصوتی پلاستیک‌ها نشان داده شده است.



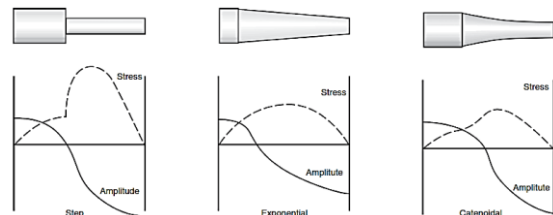
شکل ۱۰. المان‌های اصلی دستگاه جوشکاری فراصوتی پلاستیک‌ها

[۱۷]

۳. روش‌های جوشکاری فراصوتی

از روش جوشکاری فراصوتی برای اتصال انواع مواد نظیر فلزات، ترموپلاستیک‌ها و کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. در این بخش به معرفی این فرایندها، تجهیزات آنها، پارامترهای مؤثر در فرایند و مکانیزم جوشکاری پرداخته شده است.

در هورن‌های نمایی سطح مقطع به صورت نمایی (اکسپوننشیل^(۳)) در طول هورن کاهش می‌یابد و بنابراین تمرکز تنش کمتر از هورن پله‌ای است ولی مقدار تقویت دامنه ارتعاشات هم در این نوع هورن کمتر است. در هورن‌های کاتدوینال تغییر مقطع در طول یک کمان صورت می‌گیرد و بنابراین تمرکز تنش از هورن پله‌ای کمتر و افزایش دامنه ارتعاشات از هورن نمایی بیشتر است. هورن‌هایی با عرض زیاد را با شیارهایی در راستای طول هورن می‌سازند تا ارتعاشات عرضی کاسته شود و دامنه ارتعاشات طولی در پیشانی هورن به صورت یکنواخت باشد که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷. پروفیل‌های مختلف هورن جوشکاری فراصوتی به همراه

نمودار تنش و دامنه در طول هورن [۱۵]



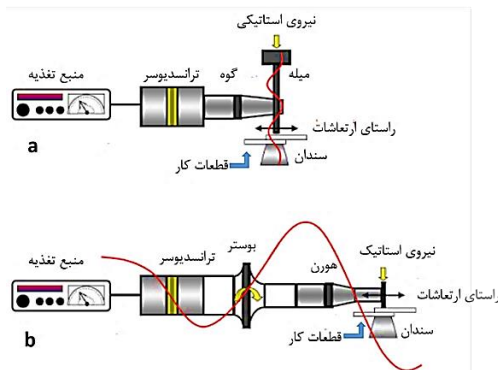
شکل ۸. هورن عریض جوشکاری فراصوتی

در مواردی که باید چند عملیات جوشکاری به صورت هم‌زمان انجام شود، از هورن‌های مرکب استفاده می‌شود که شامل یک هورن بزرگ اصلی و تعدادی هورن کوچکتر است که به هورن اصلی متصل شده‌اند. این هورن‌ها باید کاملاً متوازن و قرینه باشند تا در کارکرد سیستم مشکلی ایجاد نکنند. نمونه‌ای از هورن مرکب در شکل ۹ نشان داده شده است [۱۶].

۳-۱. جوشکاری فراصوتی فلزات

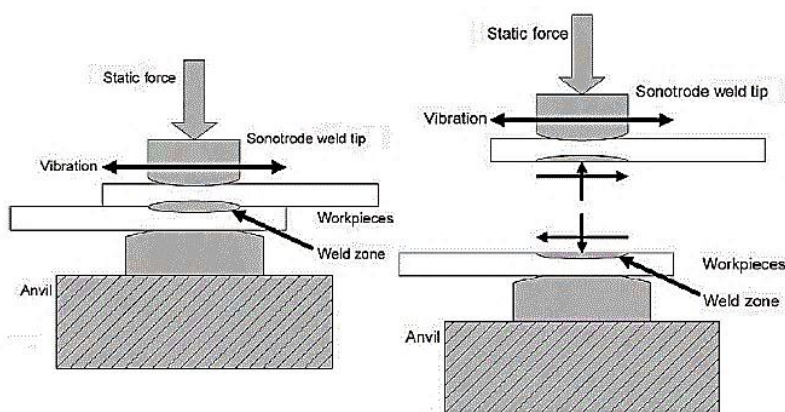
جوشکاری فراصوتی فلزات اولین بار در دهه ۱۹۶۰، پا به عرصه صنعت نهاد؛ زمانی که فهمیده شد توسط ارتعاشات فراصوت می‌توان فلزات را بدون ذوب کردن جوش داد. در این روش دو قطعه فلزی (ورق) روی هم قرار گرفته و با اعمال نیروی استاتیک (ثابت) و ارتعاشات مکانیکی، اصطکاکی بین سطوح تماس دو قطعه ایجاد شده که باعث تغییر شکل، برش و از بین رفتن اکسیدها و ناهمواری‌های سطحی و در نتیجه تماس مستقیم فلز به فلز و اتصال سطوح می‌شود. این فرایند در حالت جامد و بدون ذوب فلزات اتفاق می‌افتد. با این روش تقریباً می‌توان تمام فلزات به خصوص فلزات نرم مانند مس و آلومینیوم را جوشکاری کرد. از این روش در جوشکاری ورق‌ها، سیم‌ها، فویل‌ها و نوارها استفاده می‌شود. جوشکاری فراصوتی در اتصال اجزاء در صنایع خودسازای و هوافضا رشد بسیاری داشته است. همچنین این روش برای آب‌بند کردن و بستن محفظه‌ها و مواد حساس به حرارت بسیار مناسب است [۱۰]. جهت اعمال ارتعاشات در جوشکاری فراصوتی فلزات به صورت موازی با سطح تماس قطعات است. برای اعمال نیروی ثابت به قطعات از دو پیکربندی متفاوت مطابق شکل ۱۱ استفاده شده است. در یکی از این پیکربندی‌ها تحت عنوان سیستم محرک جانبی، نیروی ثابت توسط سندان اعمال می‌شود و در پیکربندی

دیگر تحت عنوان سیستم گوه - میله، مبدل به یک گوه (جایگزین هورن) متصل می‌شود و خود هورن نیز به یک میله قائم وصل است و روی این میله یک جسم با جرم معین قرار داده شده است که نیروی ثابت لازم را فراهم می‌کند و این نیرو از طریق گوه به قطعات منتقل می‌شود [۱۸].



شکل ۱۱. شماتیک سیستم‌های جوشکاری فراصوتی فلزات: الف) سیستم گوه - میله و ب) سیستم محرک جانبی [۱۸]

نیروهای مؤثر در جوشکاری فراصوتی فلزات شامل نیروی ثابت عمود بر سطح تماس قطعات و نیروی اصطکاک تولید شده در اثر ارتعاشات فراصوتی به موازات سطوح تماس دو قطعه است. شکل ۱۲ نیروهای مؤثر در فرایند جوشکاری فلزات را نشان می‌دهد [۱۹].

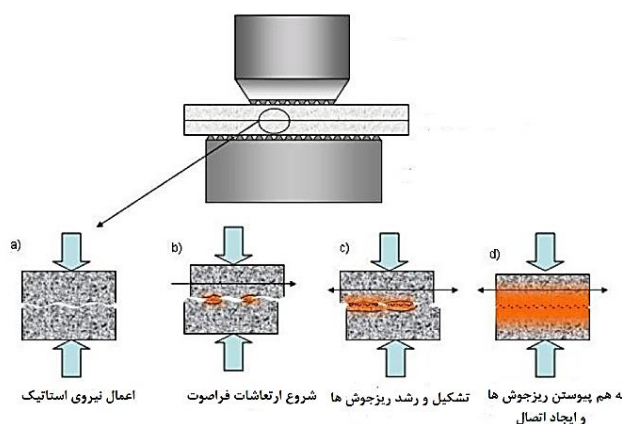


شکل ۱۲. نیروهای مؤثر در فرایند جوشکاری فراصوتی فلزات [۱۹]

۳-۱-۱. مکانیزم جوشکاری فراصوتی فلزات

نیروهای مؤثر در جوشکاری فراصوتی فلزات، نیروی برشی حاصل از ارتعاشات هم‌راستا با سطح تماس قطعات و نیروی ثابت اعمال شده در جهت عمود بر سطح قطعات هستند. سطوح قطعات بنا بر روش تولید دارای ناهمواری‌هایی است و میزان تماس خالص فلز به فلز به میزان این ناهمواری‌ها و نیروی ثابت فشاری اعمال شده، لایه‌های اکسید سطحی، روغن، گرد و خاک و سایر ناخالصی‌های پوشاننده سطح قطعه بستگی دارد. با اعمال ارتعاشات فراصوتی در جوشکاری، حرکتی اصطکاکی

بین قطعه بالایی و قطعه زیرین پدید می‌آید که مطابق شکل ۱۳ باعث برش این ناهمواری‌ها و شکستن اکسیدهای سطحی می‌شود و میزان تماس فلز به فلز را افزایش می‌دهد. این امر باعث به‌وجود آمدن نواحی کوچکی به نام ریزجوش می‌شود. تداوم ارتعاشات باعث افزایش ریزجوش‌ها شده تا جایی که این ریزجوش‌ها گسترش و به یکدیگر می‌پیوندند و در نهایت کل سطح تماس را پوشانده و جوشی یکپارچه را به‌وجود می‌آورند [۲۰].



شکل ۱۳. ایجاد و گسترش ریزجوش‌ها در جوشکاری فراصوتی فلزات [۱۸]

این فرایند در حالت جامد رخ می‌دهد و در آن مذاب ایجاد نمی‌شود ولی به این معنا نیست که افزایش دما نقشی در این فرایند ندارد. به خاطر تغییر شکل پلاستیک شدید، تغییر دمای زیادی در ناحیه جوش به‌وجود می‌آید که البته کمتر از نقطه ذوب است. این تغییر دما باعث کاهش تنش تسلیم ماده به‌صورت موضعی می‌شود و خود عامل بیشتر شدن تغییر شکل پلاستیک و سیلان ماده در ناحیه جوش می‌شود [۱۸]. در تحقیقات انجام شده [۲۱]، پروفیل ایجاد حرارت توسط ترموکوپل و روش‌های مادون قرمز اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شروع فرایند جوشکاری، دما به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و در ادامه فرایند، پایدار می‌ماند. گرمای ایجاد شده در ناحیه جوش ممکن است به قدری باشد که پدیده‌های نفوذ و تبلور مجدد رخ دهند. حداکثر دمای ثبت شده

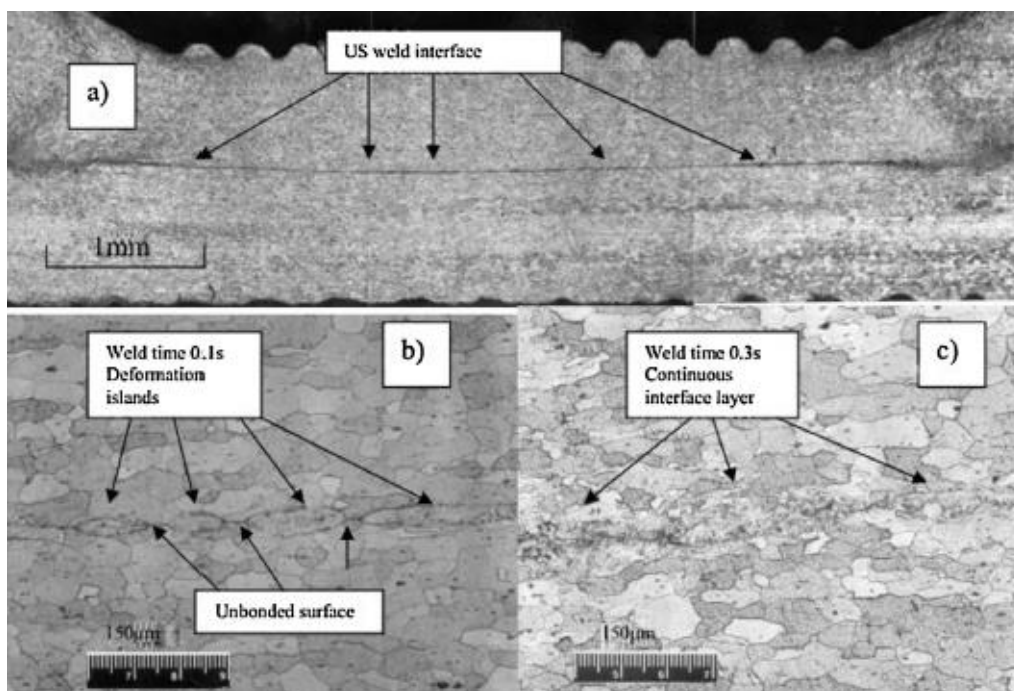
در جوشکاری فراصوتی آلومینیوم، حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۲۲]. حداکثر دمای حاصل در جوشکاری فراصوتی فلزات به خواص مکانیکی قطعه‌ی سخت‌تر بستگی دارد. به‌طور مثال دما در جوشکاری مس به فولاد بیشتر از دما در جوشکاری مس به مس است [۱۶]. در جوشکاری اجرا شده روی سه لایه ورق آلومینیوم با ضخامت‌های ۰/۳ میلی‌متر به یک ورق مسی با ضخامت ۱ میلی‌متر با کاربری اتصالات باتری خودرو، مشاهده شد که در ناحیه اتصال پس از ایجاد جوش، مواد جریان پیدا کرده‌اند و دانه‌های ریز ماده به شدت تغییر شکل یافته‌اند و لایه میانی دارای دانه‌های کشیده شده نسبتاً بزرگ است که حاکی از تبلور مجدد در محل جوشکاری است [۲۳]. مطابق نتایج حاصل از بررسی اتصال دو ورق از آلیاژ حافظه‌دار NiTi با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر با یک ورق آلومینیومی واسطه با

ضخامت ۰/۱ میلی‌متر، مکانیزم‌های به‌وجود آورنده جوش، نفوذ اتمی و تشکیل پیوند فلزی گزارش شده است [۲۴].

۳-۱-۲. بررسی متالورژیکی

ارتعاشات فراصوتی، تغییر شکل پلاستیک و گرم شدن، موقیعت را برای ایجاد اتصال ایجاد می‌کند. مطالعات متالورژیکی نشان

داده است که عرض ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل پلاستیک شده است، بسیار کم است. اندازه دانه‌ها در این ناحیه به دلیل تغییر شکل شدید پلاستیک بسیار کوچک است [۱۹]. در شکل ۱۴ تصاویری از سطح مقطع جوش فراصوتی ایجاد شده در ورق آلومینیوم و ریزساختار آن نشان داده شده است.



شکل ۱۴. سطح مقطع برش خورده جوش فراصوتی: (a) نقاط تغییر شکل یافته پس از ۰/۱ ثانیه، (b) تصویر بزرگ شده لایه جوش پیوسته و (c) ریزساختار جوش [۱۹]

۳-۲. جوشکاری فراصوتی پلاستیک‌ها

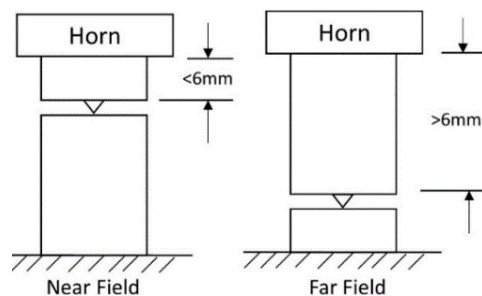
جوشکاری فراصوتی یکی از جدیدترین روش‌های اتصال ترموپلاستیک‌ها است. این روش بسیار سریع بوده و در عرض چند دهم ثانیه اتصال جوش را به‌وجود می‌آورد. برخلاف جوشکاری فلزات، در جوشکاری پلاستیک‌ها جهت اعمال ارتعاشات فراصوتی با جهت اعمال نیروی فشار ثابت هم‌راستا است. امواج فراصوتی با فرکانس زیاد و دامنه کم موجب ایجاد گرما، ذوب کردن ترموپلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های ترموپلاستیکی در ناحیه اتصال و ایجاد جوش می‌شود. هنگامی که سطوح دو قطعه روی یکدیگر قرار می‌گیرند، تماس

بین آنها به علت زبری سطح تنها در قله این ناهمواری‌ها صورت می‌گیرد. تحت ارتعاشات دینامیک فراصوتی، این قله‌های ناهمواری تحت تغییر شکل‌های چرخه‌ای قرار می‌گیرند که باعث اتلاف بخشی از ارتعاشات مکانیکی به‌صورت گرما می‌شود. گرمای تولید شده باعث ذوب ناهمواری‌ها، جریان آنها و در نتیجه تر شدن سطوح تماس می‌شود. در نتیجه جریان مذاب، نفوذ بین مولکولی و درگیر شدن زنجیره‌های پلیمری تشکیل می‌شود. پس از تر شدن سطوح تماس، اعمال ارتعاشات متوقف و مذاب به‌وجود آمده تحت فشار اعمالی سرد و سپس فشار برداشته و جوش پدید می‌آید. برای تکرارپذیری بهتر

۳-۲-۱. مکانیزم جوشکاری فراصوتی پلاستیک‌ها

جوشکاری فراصوتی ترموپلاستیک‌ها یک فرایند پیچیده است که در آن تغییر شکل‌های چرخه‌ای ناهمواری‌های سطوح اتصال باعث ایجاد گرمای موضعی و ذوب و نفوذ می‌شود. اکثر منابع جوشکاری فراصوتی ترموپلاستیک‌ها را متشکل از ۶ مرحله دانسته‌اند: ۱- ارتعاشات مکانیکی قطعات، ۲- گرم شدن ویسکوالاستیک ترموپلاستیک‌ها، ۳- انتقال حرارت، ۴- جریان یافتن ترموپلاستیک مذاب و تر کردن سطوح، ۵- نفوذ بین مولکولی و درگیر شدن زنجیره‌های پلیمری در یکدیگر و ۶- سرد و جامد شدن مذاب [۲۸، ۲۹]. دو مرحله اول مختص جوشکاری فراصوتی است ولی دیگر فرایندها تقریباً در تمامی روش‌های اتصال ترموپلاستیک‌ها مشترک هستند. ترموپلاستیک‌ها غالباً رفتار ویسکوالاستیک (ترکیبی از رفتار ویسکوز و الاستیک) از خود نشان می‌دهند. در مواد کاملاً ویسکوز، نیروی اعمالی با سرعت و تنش با نرخ کرنش به صورت خطی رابطه دارند. در این گونه مواد هنگامی که بارگذاری به صورت دینامیک باشد، نیرو و سرعت هم فاز هستند و نیرو و جابه‌جایی ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند و بنابراین تمام توان اعمال شده به ماده ویسکوز به گرما تبدیل می‌شود. در مواد کاملاً الاستیک، نیروی اعمال شده با جابه‌جایی و تنش با کرنش رابطه خطی دارند. هنگام بارگذاری دینامیک بر روی مواد کاملاً الاستیک، نیرو و جابه‌جایی هم فاز هستند و نیرو و سرعت دارای ۹۰ درجه اختلاف فاز هستند که این موضوع منجر به ذخیره شدن توان اعمالی در یک نصف سیکل در ماده کاملاً الاستیک شده و در نیم سیکل بعدی این توان آزاد می‌شود و بنابراین هیچ اتلافی وجود ندارد. ترموپلاستیک‌ها دارای ترکیبی از رفتار الاستیک و ویسکوز هستند و اختلاف فاز بین نیرو و جابه‌جایی بین صفر تا ۹۰ درجه است و مقداری از توان اعمال شده به آنها به صورت گرما تلف می‌شود [۲۹].

عملیات جوشکاری فراصوتی ترموپلاستیک‌ها، روی سطوح اتصالی قطعات ناهمواری‌هایی ایجاد می‌شود که به متمرکزکننده یا هدایت‌گر انرژی معروف هستند [۲۵]. این ناهمواری‌ها می‌توانند در حین تولید قطعات ترموپلاستیک ایجاد شوند؛ به‌عنوان مثال در قالب تزریق این قطعات، ناهمواری‌ها ایجاد شوند. هدایت‌گرهای انرژی با دلیل سطح مقطع کوچک، دچار کرنش بیشتری شده و نرخ تولید گرمای ویسکوالاستیک بیشتری را نسبت به خود قطعه ترموپلاستیک تجربه می‌کنند [۲۶]. تحقیقات زیادی روی هندسه، ابعاد، تعداد و جهت این هدایت‌گرهای انرژی انجام شده است. در جوشکاری کامپوزیت پیشرفته پلی‌اتریماید^۱ فیبرکربن نشان داده شده است که جوش با تعداد هدایت‌گر انرژی بیشتر و قرارگیری راستای هدایت‌گرها در راستای عرض پیشانی هورن، استحکام بیشتری دارد [۲۷]. استانداردهای رایج صنعتی جوشکاری فراصوتی ترموپلاستیک‌ها را براساس طول قطعه بالایی به دو دسته میدان نزدیک و میدان دور تقسیم‌بندی کرده‌اند. در جوشکاری میدان نزدیک فاصله پیشانی هورن تا سطح اتصال به‌طور معمول کمتر از ۶ میلی‌متر است. در جوشکاری میدان دور این مقدار بیشتر از ۶ میلی‌متر است. جوشکاری میدان نزدیک بیشتر برای ترموپلاستیک‌های نرم و متخلخل و میدان دور برای ترموپلاستیک‌های صلب و آمورف مناسب است که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود [۱۷].

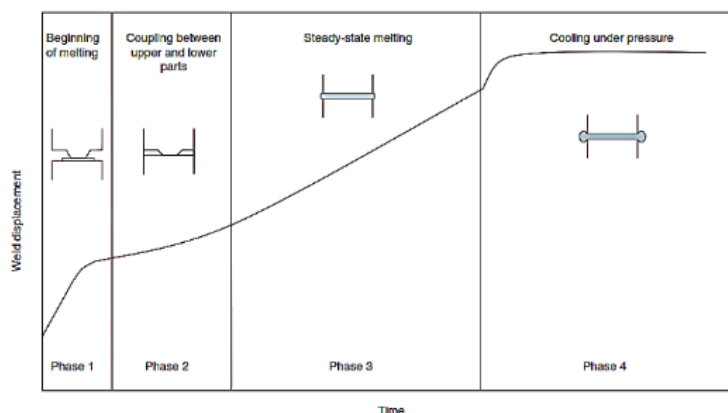


شکل ۱۵. تقسیم‌بندی جوشکاری ترموپلاستیک‌ها براساس ضخامت

قطعه بالا [۱۷]

نمودار میزان پایین آمدن هورن روی قطعات پلاستیکی برحسب زمان مطابق شکل ۱۶ نشان دهنده چهار مرحله از ابتدای تماس هورن با قطعه تا زمان ایجاد جوش است. در مرحله اول نوک هدایت گر انرژی شروع به ذوب شدن می کند. در این حالت این ناحیه از هدایت گر در تماس با قطعه دیگر قرار دارد و به آن فشرده شده است. در این مرحله به علت ذوب هدایت گر انرژی و جاری شدن روی سطح تماس، هورن به سرعت پایین می آید. در مرحله بعد با پخش ذوب شده هدایتگر انرژی روی سطح تماس، نرخ ذوب شدن کاهش می یابد. سپس، سطوح در تماس کامل با یکدیگر قرار گرفته و نرخ ذوب شدن مجدد افزایش یافته و پایدار می شود و یک لایه ذوب شده با ضخامت و توزیع دمای ثابت در ناحیه جوش شکل می گیرد. توقف ارتعاشات که در انتهای این مرحله و شروع مرحله چهارم صورت می گیرد،

براساس رسیدن به: ۱) یک حد مشخص توان، ۲) یک مقدار مشخص پایین آمدن هورن و یا ۳) یک زمان مشخص تنظیم شده است. در دستگاه های مختلف یکی از این سه مورد، معیار توقف ارتعاشات است. پس از متوقف کردن ارتعاشات در مرحله چهارم، فشار روی قطعات نگهداشته شده و اتصال مولکولی تشکیل و مذاب خنک و جوش به وجود می آید [۲۵]. پارامترهای اصلی این فرایند نیرو و زمان اعمال ارتعاشات، دامنه ارتعاشات، نیروی اعمالی پس از ارتعاشات و زمان اعمال آن هستند. فرکانس ارتعاشات در این فرایند معمولاً بین ۱۰ تا ۷۵ کیلوهرتز است که در اغلب موارد فرکانس ۲۰ کیلوهرتز انتخاب می شود. دامنه ارتعاشات در فرایندهای جوشکاری فراصوتی ترموپلاستیک ها بین ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرومتر متغیر است [۲۶].



شکل ۱۶. منحنی جابه جایی هورن برحسب زمان؛ فاز یک: شروع ذوب؛ فاز دو: ایجاد اتصال بین دو قطعه؛ فاز سه: ذوب حالت پایدار؛ فاز چهار: سرمایش تحت فشار [۲۵]

۳-۲-۲. پیکربندی دستگاه های جوشکاری فراصوتی پلاستیک ها

جوشکاری منقطع: از این روش برای جوشکاری قطعات مجزا استفاده می شود. در این روش قطعات در فیکسچر جوشکاری یا روی سندان قرار می گیرند، سپس کنگی فراصوتی توسط یک عملگر که می تواند پنوماتیک یا مکانیزم های مکانیکی مانند بال اسکرو^۹ باشد، به پایین حرکت می کند تا هورن به سطح قطعه بالایی برسد، سپس هورن به یک میزان

مشخص نیروی ثابت فشاری به قطعات اعمال می کند. بعد از این مرحله ارتعاشات فراصوتی شروع می شوند و تحت نیروی ثابت قبلی، این ارتعاشات به قطعات اعمال می شوند. زمان اعمال ارتعاشات از قبل روی دستگاه تنظیم شده است. پس از اتمام ارتعاشات، هورن نیروی ثابت را برای زمانی مشخص روی قطعات جوشکاری شده اعمال می کند و سپس این نیرو هم متوقف شده و کنگی فراصوتی به بالا حرکت می کند و از روی قطعات بلند می شود. از این روش برای

۳-۳-۱. فرکانس تشدید

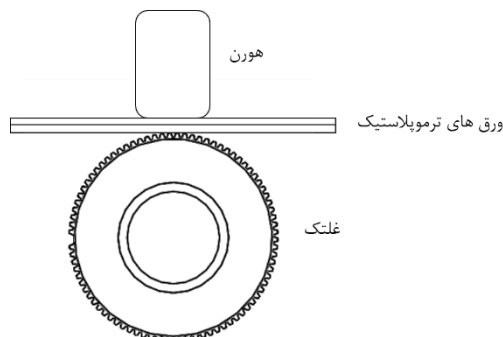
فرکانس سیستم‌های فراصوتی برحسب نوع کاربرد متفاوت بوده و در دستگاه‌های جوشکاری فراصوتی این فرکانس معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز است. توان مورد نیاز جوشکاری در انتخاب فرکانس مناسب مؤثر است و به ابعاد قطعات و ابعاد ناحیه جوش بستگی دارد. استفاده از فرکانس ۱۵ کیلوهرتز برای مواردی که توان بالا نیاز است (مانند جوشکاری ایمپلرهای پلاستیکی) نیز مرسوم است. در حین کار عواملی مانند افزایش اندازه قطعات مجموعه فراصوتی در اثر گرم شدن، سایش قطعات، تعویض قطعات و تغییر نیروی جوشکاری باعث تغییر فرکانس تشدید مجموعه می‌شود. در دستگاه‌های مدرن، مدار الکترونیکی برای بازخورد گرفتن از مجموعه در هنگام کار و تغییر فرکانس، وجود دارد و به مدار خود تنظیم معروف است [۳۱].

۳-۳-۲. دامنه ارتعاش

دامنه ارتعاشات یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در جوشکاری و مرتبط با انرژی داده شده به ناحیه جوش است. دامنه ارتعاشات در جوشکاری فراصوتی در حدود ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر (حداکثر تا ۱۰۰ میکرومتر) است. در جوشکاری‌های ظریف، مثل طلاسازی‌ها، دامنه ارتعاشات در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر و فرکانس در محدوده ۴۰ کیلوهرتز است. در جوشکاری سیم‌های مسی دامنه در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرومتر و فرکانس در محدوده ۲۰ کیلوهرتز است [۲].

انرژی مصرف شده در ناحیه جوشکاری با توان دوم دامنه ارتعاشات رابطه مستقیم دارد. برخی دلایل مانند نوسانات برق و افت ولتاژ باعث کاهش دامنه می‌شوند که این افت دامنه خود باعث افت انرژی شده و در نتیجه موجب عدم تشکیل جوش به صورت کامل می‌شود.

جوشکاری نقطه‌ای قطعات و ورقه‌های ترموپلاستیک استفاده می‌شود. همچنین در این روش کلگی فراصوتی می‌تواند به صورت قابل حمل باشد و اعمال نیرو توسط اپراتور صورت گیرد که در شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد [۲۵]. جوشکاری پیوسته: از این روش برای اتصال فیلم‌های ترموپلاستیک و پارچه استفاده می‌شود. در این روش فیلم یا لایه‌هایی جوش شونده به یکدیگر، بین هورن و غلتک قرار می‌گیرند و الگوی جوشکاری اعمالی روی لایه‌ها، بر روی غلتک ایجاد می‌شود. با چرخش غلتک، این لایه‌ها بین هورن و غلتک عبور می‌کنند و الگوی جوشکاری روی آنها ایجاد می‌شود که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. همچنین ممکن است هورن نیز به صورت غلتک ساخته شود و لایه‌ها بین یک غلتک دوار عادی و یک هورن گرد عبور کنند و جوش داده شوند [۲۵]. برای توزیع سایش روی هورن گرد، ممکن است از یک مکانیزم با موتور محرک جهت دوران هورن بهره گرفته شود. از این روش برای جوشکاری لایه‌ها و فیلم‌های با ضخامت کمتر نسبت به روش منقطع استفاده می‌شود زیرا زمان جوشکاری در این روش کمتر است [۳۰].



شکل ۱۷. جوشکاری پیوسته ترموپلاستیک

۳-۳-۳. پارامترهای جوشکاری فراصوتی

جوشکاری فراصوتی مانند تمام دیگر فرایندهای جوشکاری، دارای پارامترهایی است که متناسب با نوع و ابعاد و جنس قطعه و دیگر شرایط کاری انتخاب می‌شوند.

همچنین در صورت افزایش ولتاژ از مقدار اسمی، دامنه زیاد شده و انرژی هم افزایش یافته و ذوب بیش از حد صورت می‌گیرد. این جوش ناقص و یا جوش با ذوب بیش از حد باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود. در منبع تغذیه‌های جدید تدابیری اندیشیده شده است که با نوسانات برق یا شرایط محیط عملکرد یا دلایل دیگر، دامنه ارتعاشات ثابت بماند [۳۲].

قابلیت دیگر، مرتبط به دامنه ارتعاشات در منبع تغذیه‌های جدید، تغییر دامنه حین اعمال فشار است. این قابلیت به معنای تغییر کنترل شده دامنه ارتعاشات در حین جوشکاری است. دامنه ارتعاشات در ابتدای فرایند - تشکیل مذاب - باید حداکثر باشد تا ذوب شدن سریع اتفاق بیفتد. پس از ایجاد مذاب باید دامنه کاهش یابد تا انرژی انتقال یافته به مذاب کم شود تا ویسکوزیته آن بیش از حد کاهش نیابد. زیرا در این صورت مولکول‌های پلاستیک با جریان هم‌راستا می‌شوند و باعث ایجاد جوش با استحکام پایین می‌شوند. در صورتی که با کاهش دامنه، این کاهش ویسکوزیته بیش از حد اتفاق نمی‌افتد و مولکول‌ها به‌صورت رندوم در تمام جهات توزیع و درگیری بین مولکول‌ها به خوبی صورت می‌گیرد. همچنین تنش پسماند ایجاد شده کمتر از حالت با دامنه ثابت است. مجموعه این عوامل باعث افزایش استحکام جوش تا ۳۰ درصد می‌شوند [۳۳]. دامنه ارتعاشات را می‌توان به دو طریق تنظیم کرد: ۱) افزایش یا کاهش ضریب بزرگ‌نمایی بوستر و هورن و ۲) تنظیم مقدار ولتاژ الکتریکی منبع تغذیه، که اولی برای مقیاس بزرگتر از دومی به کار می‌رود. در جوشکاری‌های میدان دور و جوشکاری مواد شبه کریستالی نیاز به دامنه بزرگتری نسبت به جوشکاری میدان نزدیک و جوشکاری مواد آمورف است. به‌طور معمول برای جوشکاری ترموپلاستیک‌های آمورف از دامنه ۱۰۰-۳۰ میکرومتر و برای ترموپلاستیک‌های کریستالی از دامنه ۱۲۵-۶۰ میکرومتر استفاده می‌شود [۲۵].

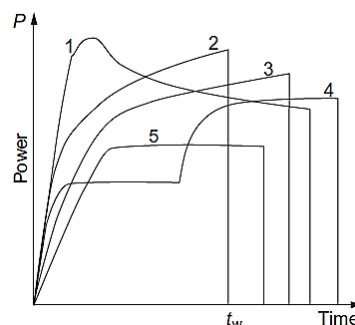
۳-۳-۳. نیروی ثابت

یکی دیگر از پارامترهای کلیدی نیروی ثابت ایجاد شده توسط سندان و هورن جوشکاری است که به جنس و ضخامت قطعات و مساحت ناحیه جوش بستگی دارد. این نیرو از چند ده نیوتن تا چند کیلو نیوتن متغیر است. در صورت کمتر بودن از مقدار لازم، جوش ضعیفی ایجاد می‌شود و اگر بیشتر از حد لازم باشد، باعث افزایش ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌شود. برای مثال برای ایجاد ۴۰ میلی‌متر مربع جوش در ورق آلیاژ آلومینیوم سری ۶۰۰۰ به نیرویی در حدود ۱۵۰۰ نیوتن نیاز است، در صورتی که ۱۰ میلی‌متر مربع جوش در ورق مسی نرم تنها به ۴۰۰ نیوتن نیرو نیاز دارد [۱۹، ۲۳]. از این رو تعیین نیروی جوشکاری بر مبنای تنش تماسی در سطوح صورت می‌پذیرد. اگر مقدار نیرو زیاد باشد باعث هم‌راستا شدن زنجیره‌های مولکولی و کاهش استحکام جوش می‌شود. اگر این نیرو بیش از حد زیاد باشد، ممکن است باعث اضافه بار روی هورن و در نتیجه مانع ارتعاشات هورن شده و اصطلاحاً ارتعاشات را خفه کند. در جوشکاری برخی مواد مانند پلی‌کربنات، پس از جوشکاری در ناحیه جوش حباب‌های هوا دیده می‌شود که این حباب‌ها باعث کاهش استحکام جوش و نیز عدم آب‌بندی جوش می‌گردد. برای رفع این مشکل در سیستم‌های جدید قابلیت‌ها به نام تنظیم نیرو وجود دارد که نیرو را در حین عملیات جوشکاری تغییر می‌دهد. در انتهای فرایند که ارتعاشات متوقف می‌شود و سطح تماس هنوز به‌صورت مذاب است، افزایش ناگهانی نیرو موجب خروج حباب‌ها شده و جوشی یکپارچه و مستحکم و آب‌بند پدید می‌آید [۳۴].

۳-۳-۴. توان و انرژی

مساحت زیر منحنی زمان - توان که در شکل ۱۸ دیده می‌شود بیانگر انرژی جوشکاری و به‌عبارت دقیق‌تر انرژی داده شده به مبدل در حین عمل جوشکاری است. این سه پارامتر نمی‌توانند از یکدیگر مستقل باشند.

بنابراین می‌توان حداکثر توان را تنظیم کرد و انرژی و زمان تابع آن باشند و جوشکاری تا رسیدن به آن حداکثر توان تنظیم شده ادامه پیدا کند و یا انرژی تنظیم شود و جوشکاری تا زمان رسیدن به مقدار تنظیم شده انرژی ادامه پیدا کند. در عمل منحنی توان - زمان براساس جنس و هندسه مواد و فرکانس و دامنه ارتعاشات می‌تواند اشکال مختلفی به خود بگیرد [۳۵].



شکل ۱۸. منحنی توان-زمان در جوشکاری فراصوتی فلزات [۳۵]

مقدار واقعی توان داده شده به منطقه جوش متأثر از عواملی چون بازده الکترومکانیکی پیروسرامیک‌ها، میزان اتلاف در اجزای ارتعاشی (مانند مبدل، بوستر و هورن) و سطوح تماس آنها و توان گرمایی منتقل شده از ناحیه جوش به قطعه کار و سندان است. توان اعمالی به مبدل توسط منبع تغذیه قابل اندازه‌گیری است و با تخمین زدن اتلاف‌ها و کم کردن مقدار آنها از این توان می‌توان توان داده شده به منطقه جوش را به‌دست آورد.

۳-۳-۵. زمان جوشکاری

بنابر سیستم دستگاه جوشکاری زمان می‌تواند یک پارامتر مستقل یا وابسته باشد. زمان جوشکاری معمولاً زیر یک ثانیه

است. زمان جوشکاری شامل دو بخش است: قسمتی که ارتعاشات به قطعه منتقل می‌شود و قسمتی که ارتعاشات متوقف ولی نیروی روی قطعات نگه داشته می‌شود. با افزایش زمان اعمال ارتعاشات تا یک مقدار بهینه استحکام جوش بالا می‌رود و پس از آن استحکام افت می‌کند. زمان بهینه برای هر جنس و قطعه از طریق آزمون و خطا به‌دست می‌آید [۲۵].

۳-۳-۶. جوش پذیری فلزات

خواص مواد مانند مدول الاستیک، تنش تسلیم، سختی و میکروساختار خواص تعیین کننده‌ای هستند. به‌طور کلی فلزات نرم مانند مس و آلومینیوم و طلا و منیزیم راحت‌تر جوشکاری می‌شوند و با افزایش سختی فلز، جوشکاری آن سخت‌تر می‌شود. پس از سختی، شرایط سطحی قطعه کار عامل تعیین کننده است که این شرایط شامل میزان پرداخت، اکسیدها، پوشش فلز و ناخالصی‌ها است [۱۰].

۳-۳-۷. جوش پذیری پلاستیک‌ها

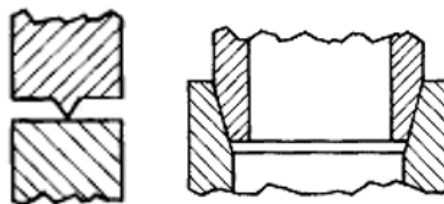
قابلیت جوش‌پذیری در ترموپلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های ترموپلاستیکی به پارامترهایی از قبیل توانایی ترموپلاستیک در انتقال ارتعاشات به ناحیه جوش، اتلاف انرژی و تبدیل ارتعاشات به گرما، نفوذ و درگیری بین زنجیره‌های پلیمری و داشتن نقطه ذوب یکسان یا نزدیک وابسته است. در شکل ۱۹ ترموپلاستیک‌های متداول جوشکاری شده با روش جوشکاری فراصوتی نشان داده شده است [۳۶].

	ABS	ABS/polycarbonate	Acetal	Acrylic	Cellulose acetate	ECTFE	LCP	Polyamide	PES	PPO	PC	PC/polyester	PBT	PET	PEEK	PEI	PE	PPS	PP	Polystyrene	Polysulfone	PVC	PTFE	PVDF	SAN
ABS	Compatible																								
ABS/polycarbonate	Compatible	Compatible																							
Acetal			Compatible																						
Acrylic		Some compatible		Compatible																					
Cellulose acetate					Compatible																				
ECTFE						Compatible																			
LCP							Compatible																		
Polyamide								Compatible																	
PES									Compatible																
PPO										Compatible															
PC											Compatible														
PC/polyester												Compatible													
PBT													Compatible												
PET														Compatible											
PEEK															Compatible										
PEI																Compatible									
PE																	Compatible								
PPS																		Compatible							
PP																			Compatible						
Polystyrene	Some compatible																			Compatible					
Polysulfone																					Compatible				
PVC																						Compatible			
PTFE																							Compatible		
PVDF																								Compatible	
SAN	Some compatible		Some compatible																					Compatible	

شکل ۱۹. ترموپلاستیک‌های جوش‌پذیر به روش فراصوت [۳۶]

۳-۳-۸. شکل اتصال جوش فراصوتی

در جوشکاری فراصوتی پلاستیک‌ها دو شکل اتصال وجود دارد: اتصال هدایت‌گر انرژی و اتصال برشی. در نوع اول یک برآمدگی اغلب مثلثی شکل روی سطح اتصال قالب‌گیری می‌شود که ارتعاشات باعث ذوب شدن آن و تر شدن سطح تماس می‌شود. اگر عرض ناحیه اتصال زیاد باشد بیشتر از یک هدایت‌گر انرژی بر سطح قطعه قالب‌ریزی می‌شود. در شکل ۲۰-الف یک نمونه اتصال با هدایت‌گر انرژی نشان داده شده است [۲۵]. از اتصالات برشی بیشتر برای درزگیری استفاده می‌شود که در شکل ۲۰-ب قابل مشاهده است. در این نوع اتصال عمق جوش بیشتر بوده و بنابراین زمان بیشتری برای ذوب شدن و ایجاد جوش در ترموپلاستیک مورد نیاز است [۲۵].



شکل ۲۰. الف) اتصال با هدایت‌گر انرژی و ب) اتصال برشی [۳۵]

۳-۳-۹. هندسه قطعات

پارامتر مهم دیگر در فرایند جوشکاری فراصوتی فلزات هندسه قطعات است که در مورد این فرایند ضخامت قطعات نقش اصلی را بر عهده دارد. هر چقدر ضخامت قطعات کمتر باشد، شانس به‌وجود آمدن جوش موفق بیشتر است. با افزایش ضخامت قطعه بالایی که در تماس با هورن جوشکاری است نیاز به نیروی جوشکاری و توان بیشتر و هورن جوشکاری با سطح مقطع بزرگتری است. حداکثر ضخامت به جنس قطعات جوش‌شونده و توان دستگاه بستگی دارد.

برای مثال ورق‌های آلایزهای سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ آلومینیوم با ضخامت ۱ تا ۲ میلی‌متر را می‌توان با دستگاه‌های ۲/۵ تا ۳/۵ کیلووات جوشکاری کرد [۳۷]. پارامتر دیگر در مورد هندسه قطعات که نسبت به ضخامت از اهمیت کمتری برخوردار است، عرض ناحیه‌ای است که قرار است جوشکاری شود. در قطعات کوچک به دلیل ابعاد کوچکی که نسبت به طول موج دارند، احتمال تشدید بسیار کم است، ولی در قطعات بزرگ به خاطر نزدیک بودن ابعاد به طول موج



شکل ۲۱. اتصالات ایجاد شده توسط جوشکاری فراصوتی فلزات

[۳۹]

	Al	Be	Cu	Co	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pd	Pt	Si	Ag	Ta	Sn	Ti	W	Zr
Al alloys	█																	
Be alloys		█																
Cu alloys			█															
Co				█														
Au					█													
Fe alloys						█												
Mg alloys							█											
Mo alloys								█										
Ni alloys									█									
Pd										█								
Pt alloys											█							
Si												█						
Ag alloys													█					
Ta alloys														█				
Sn															█			
Ti alloys																█		
W alloys																	█	
Zr alloys																		█

█ = Acceptable combinations
 □ = Not successful or unknown

شکل ۲۲. فلزات دارای قابلیت جوشکاری با روش فراصوتی [۲]

جوشکاری فراصوتی پلاستیک‌ها: در صنایع پلاستیک، از فرایند جوشکاری فراصوتی، برای ایجاد اتصال در قطعات خودرو، وسایل پزشکی، محفظه باتری و صنایع بسته‌بندی استفاده می‌شود. در مواردی که نیاز به جوش کاملاً آب‌بند و بدون هیچگونه منفذی باشد مانند کیسه‌های انتقال خون و مواد غذایی که در معرض هوا فاسد می‌شوند، جوشکاری فراصوتی گزینه بسیار مناسبی است [۴۱]. بسیاری از قطعات خودرو به دلیل پیچیدگی هندسی‌ای که دارند، قابلیت قالب‌گیری یکپارچه را ندارند و به همین دلیل این قطعات به صورت جداگانه توسط فرایند تزریق پلاستیک ساخته می‌شوند و سپس با جوشکاری فراصوتی، مونتاژ می‌شوند [۴۱].

فراصوتی، احتمال تشدید وجود دارد که با تغییر ابعاد قطعه کار و استفاده از کلمپ‌هایی برای میرا کردن ارتعاشات قطعه، می‌توان از این مشکل جلوگیری کرد [۱۸].

۴. کاربردهای جوشکاری فراصوتی

کاربردهای جوشکاری فراصوتی در فلزات و پلاستیک‌ها گسترده است و نمونه بارز آن در صنایع خودروسازی، الکترونیک، هوافضا و پزشکی قابل مشاهده است [۳۸].

جوشکاری فراصوتی فلزات: مهم‌ترین کاربردهای رو

به گسترش جوشکاری فلزات شامل درز جوش‌های لوله‌های مسی در مبدل‌های حرارتی، نوارهای رسانای الکتریکی بر روی پنل‌های خورشیدی، و اتصال سیم‌ها با یکدیگر و سیم به ترمینال در ساخت باتری‌ها اشاره نمود [۳۹، ۳۳]. در ساخت باتری‌ها و پیل‌های سوختی از فرایند جوشکاری فراصوتی برای اتصال ورق‌ها و فویل‌های آلومینیومی و مسی و نیکیلی به یکدیگر استفاده می‌شود. بنابراین این روش گزینه مناسبی برای اتصال ورق‌ها درون باتری‌های لیتیوم-یون است زیرا در باتری قطعاتی وجود دارند که نسبت به گرما حساس هستند و در روش جوشکاری فراصوتی، در فاصله یک سانتی‌متری از منطقه جوش، دما از ۶۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز نمی‌کند [۴۰]. طیف وسیعی از فلزات را می‌توان به روش جوشکاری فراصوتی به یکدیگر متصل نمود. البته هر ضخامتی از آنها را نمی‌توان جوشکاری کرد و بنابر توان دستگاه و مدول الاستیک و سختی فلز، محدودیتی در ضخامت قابل جوشکاری وجود دارد. در شکل ۲۲ نموداری جامع نشان‌دهنده قابلیت جوش‌پذیری انواع مواد فلزی به روش فراصوتی است [۲].

از جوشکاری فراصوتی در اتصالات قطعات کامپوزیت فوق سبک در صنایع هوافضا استفاده می‌شود [۲۶]. یکی از کاربردهای جوشکاری فراصوتی که در حال حاضر بسیار چشمگیر است، جوشکاری لایه‌های مختلف ماسک‌های

جراحی و پزشکی است که از این فرایند با نام دوخت فراصوتی یاد می‌شود. در شکل ۲۳ نمونه‌هایی از کاربردهای پزشکی این فرایند نشان داده شده است.



شکل ۲۳. نمونه‌هایی از کاربرد جوشکاری فراصوتی ترموپلاستیک‌ها در تجهیزات پزشکی

۵. مزایا و محدودیت‌های جوشکاری فراصوتی

همانند تمامی فرایندهای جوشکاری، جوشکاری فراصوتی نیز دارای مزایای منحصر به فرد و محدودیت‌هایی است که با

پژوهش‌های در حال انجام، به تدریج بر این محدودیت‌ها غلبه می‌شود. این مزایا و محدودیت‌ها به صورت خلاصه در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱. مزایا و محدودیت‌های جوشکاری فراصوتی فلزات [۲، ۱۰، ۱۸، ۴۲]

مزایا	محدودیت‌ها
جوش در حالت جامد و بدون ذوب ایجاد می‌شود.	محدود به جوشکاری به شکل لبه‌ای روی هم
مناسب برای جوشکاری فلزات با هدایت حرارتی زیاد مانند مس که با روش‌هایی مانند جوشکاری مقاومتی قابل جوشکاری نیستند.	محدودیت در ضخامت قطعات که با توجه به جنس قطعات این محدودیت متفاوت است.
قابلیت جوشکاری فلزات ناهم جنس	با اعمال نیروی فشاری توسط هورن به قطعه بالایی این قطعه دچار تغییر شکل می‌شود.
قابلیت جوشکاری قطعات نازک به قطعات ضخیم	
زمان جوشکاری بسیار کوتاه	
قابلیت اتوماسیون و کنترل کردن فرایند	در صورت بزرگ بودن قطعات جوشکاری ممکن است این قطعات دچار ارتعاشات هارمونیک شوند و نوفه در محدوده شنوایی انسان ایجاد کنند.
عدم نیاز به فیلتر و گاز و دیگر مواد مصرفی	
انرژی مصرفی بسیار کم در مقایسه با دیگر فرایندها	

مزایا	محدودیت‌ها
قابلیت جوشکاری ترموپلاستیک‌های آمورف و شبه کریستالی	محدود به جوشکاری به شکل لبه‌ای روی هم و اتصالات برشی
زمان جوشکاری بسیار کوتاه	محدودیت در ضخامت قطعات که با توجه به جنس قطعات این محدودیت متفاوت است.
قابلیت جوشکاری قطعات نازک به قطعات ضخیم	با اعمال نیروی فشاری توسط هورن به قطعه بالایی این قطعه دچار تغییر شکل می‌شود.
انرژی مصرفی بسیار کم در مقایسه با دیگر فرایندها	قابلیت اتوماسیون و کنترل کردن فرایند
عدم نیاز به فیلر و گاز و دیگر مواد مصرفی	در صورت بزرگ بودن قطعات جوشکاری ممکن است این قطعات دچار ارتعاشات هارمونیک شوند و نوفه در محدوده شنوایی انسان ایجاد کنند.
عدم ایجاد آلودگی زیست محیطی	

۶. نتیجه‌گیری و آینده تحقیقات در زمینه جوشکاری فراصوتی

امروزه استفاده از فناوری فراصوت در اتصال قطعات، رشد چشمگیری داشته است. با پیدایش مواد و ساخت کامپوزیت‌ها و آلیاژهای جدید، نیاز به روش‌های نوین برای اتصال آنها، احساس می‌شود. روش فراصوت می‌تواند انتخاب مناسبی برای پاسخگویی به نیازهایی از این قبیل باشد. از جمله کاربردهایی که می‌توان برای آینده این فرایند در مقیاس صنعتی متصور بود عبارتند از:

۱- جوشکاری مواد ترموپلاست در کامپوزیت‌های فوق سبک که به دلیل استحکام زیاد و چگالی کمی که دارند استفاده از آنها به شدت در حال گسترش است.

۲- ترکیب فناوری فراصوت با سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر برای تسریع فرایندهای ساخت که برای جوشکاری، این انعطاف سیستم، با تعویض هورن یا فیکسچر، قابل حصول است.

۳- فناوری سبز فراصوت: استفاده از امواج فراصوتی در فرایندهای مختلف مانند جوشکاری، به دلیل انرژی مصرفی کم و عدم تولید ضایعاتی مانند سرباره، باعث شده است که از این فرایندها به‌عنوان فرایندهای سازگار و دوستدار محیط زیست نام برده شود.

۴- جوشکاری مواد نو: پیدایش مواد جدید مانند پلاستیک‌های قابل بازیافت، گسترش استفاده از این فرایند را به دنبال خواهد داشت.

۵- چند جوشکاری هم‌زمان اصطلاحی است که برای توصیف فرایند اجرای هم‌زمان چندین جوشکاری در یک مرحله بر روی یک قطعه به کار برده می‌شود. این فرایند که به خصوص در صنعت خودروسازی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود، با فرایند جوش فراصوتی قابلیت اجرا با سرعت بالا و انرژی کم را دارد.

۶- استفاده از امواج فراصوتی برای اتصال قطعات فلزی و پلاستیکی. به‌طور مثال برای جازدن قطعات کوچک فلزی در قطعات پلاستیکی (اینسرت^۱) که به‌طور معمول برای این کار، این قطعات فلزی در قالب تزریق قطعه پلاستیکی قبل از تزریق قرار داده می‌شوند. با ایجاد سوراخ با قطر کمتر از قطر قطعه فلزی در قطعه پلاستیکی و اعمال ارتعاشات روی قطعه فلزی، می‌توان آن را در پلاستیک جا زد و بین آنها اتصالی ایجاد کرد.

۷- استفاده از این فرایند در صنایع نساجی که ممکن است چند پارچه با جنس مختلف باید به یکدیگر متصل شوند، سرعت و تکرارپذیری فرایند را بالا می‌برد.

۸- استفاده از فرایند جوشکاری فراصوتی فلزات برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی که به سرعت در حال جایگزین شدن به جای فلزات معمول و متداول صنعتی هستند.

استفاده از ارتعاشات فراصوتی برای اتصال دهی قطعات دارای مزایای قابل توجهی است که محققان و صنعتگران را به سمت استفاده از آن سوق می‌دهد. با جمع‌بندی نتایج و بحث‌های ارائه شده در این مقاله جدول ۳ خلاصه کاربردها، مکانیزم‌های تأثیرگذار، مزایا و پارامترهای فرایند را نشان می‌دهد.

جدول ۳. خلاصه کاربردها، مکانیزم‌ها، مزایا و پارامترهای اعمال ارتعاشات فراصوتی در فرایندهای اتصال دهی

مواد	پارامترها	تاثیر/مکانیزم	کاربردها
جوشکاری پلاستیک‌ها			
GF/PPS	فرکانس	ارتعاشات مکانیکی قطعات، گرم شدن	ماسک پزشکی و N95
CF/PA66	دامنه ارتعاش	ویسکوالاستیک ترموپلاستیک‌ها، انتقال	قطعات خودرو
CF/Nylon 66	فشار/نیرو جوش	حرارت، جریان یافتن ترموپلاستیک	وسایل خانگی
CF/PEEK	زمان جوش	مذاب و تر کردن سطوح، نفوذ بین	تجهیزات پزشکی
GF/Nylon 66	کنترل فرایند	مولکولی و درگیر شدن زنجیره‌های	صنایع نساجی
CF/Epoxy	جنس ماده	پلیمری در یکدیگر و سرد و جامد شدن	صنایع بسته بندی
CF/PEI			
CF/Al		مذاب	اتصال کامپوزیت به لاستیک‌ها
GF/Al			
جوشکاری فلزات			
Al/Mg	فرکانس	اعمال ارتعاشات فراصوتی موازی با	اتصال سیم و کابل
Al/CFRP	دامنه ارتعاش	سطوح تماس، ایجاد اصطکاک بین دو	اتصال سیم و ترمینال الکتریکی
Al/Cu	فشار/نیرو جوش	سطح، ایجاد گرما و به وجود آمدن تماس	سیل لوله‌های مسی
Cu/Ni	زمان جوش	مستقیم فلز به فلز، نرم شدن محل تماس	اتصال الکترود به پنل خورشیدی
Al/Ni	کنترل فرایند	و نفوذ بین مولکولی و ایجاد ریزجوش‌ها،	اتصال الکتریکی باطری
Al/Ag	جنس ماده	متصل شدن ریزجوش‌ها به یکدیگر، سرد	اتصال کامپوزیت به فلز
Ag/Au		شدن جوش تحت فشار	
Cu/Mg			

۷. ماخذ

- [1] Handbook, A. S. M. "Welding, brazing and soldering", 1993, pp.297-324.
- [2] Gallego-Juárez, Juan A., and Karl F. Graff, eds. "Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound", Elsevier, 2014.
- [3] Fartashvand, Vahid, Amir Abdullah, and Seyed Ali Sadough Vanini, "Effects of high power ultrasonic vibration on the cold compaction of titanium", *Ultrasonics sonochemistry*, 2017, Vol.36, pp.155-161.
- [4] Abedini, Rezvan, Amir Abdullah, and Yunes Alizadeh, "Ultrasonic assisted hot metal powder compaction", *Ultrasonics sonochemistry*, 2017, Vol.38, pp.704-710.
- [5] 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, no.2, pp.191-198.

- [6] 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.
- [7] Shakouri, Ehsan, Mohammad Hossein Sadeghi, Mehdi Maerefat, Mohammad Reza Karafi, and Mehdi Memarpour, "Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone", *Modares Mechanical Engineering*, 2014, Vol.14, no.6, pp.194-200.
- [8] Abdullah, Amir, Massoud Malaki, and Ahmad Eskandari, "Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening", *Materials & Design*, 2012, Vol.38, pp.7-18.
- [9] Ghaedi, M., S. Hajjati, Z. Mahmudi, I. Tyagi, Shilpi Agarwal, A. Maity, and V. K. Gupta, "Modeling of competitive ultrasonic assisted removal of the dyes–Methylene blue and Safranin-O using Fe₃O₄ nanoparticles", *Chemical Engineering Journal*, 2015, Vol.268, pp.28-37.
- [10] Harthoorn, Johannes Leendert, "*Ultrasonic metal welding*", 1978.
- [11] Frederick, J. R., "*Ultrasonic Engineering, New York*", 1965, p.185.
- [12] Abdullah, Amir, Mohsen Shahini, and Abbas Pak, "An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer", *Journal of Electroceramics*, 2009, Vol.22, no.4, pp.369-382.
- [13] Abdullah, Amir, and Abbas Pak, "Correct prediction of the vibration behavior of a high power ultrasonic transducer by FEM simulation", *the international journal of advanced manufacturing technology*, 2008, Vol.39, no.1-2, pp.21-28.
- [14] Rani, M. Roopa, K. Prakasan, and R. Rudramoorthy, "Studies on thermo-elastic heating of horns used in ultrasonic plastic welding", *Ultrasonics*, 2015, Vol.55, pp.123-132.
- [15] Rani, M. Roopa, and R. Rudramoorthy, "Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding", *Ultrasonics*, 2013, Vol.53, no.3, pp.763-772.
- [16] Kumar, S., C. S. Wu, G. K. Padhy, and W. Ding, "Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review", *Journal of manufacturing processes*, 2017, Vol.26, pp.295-322.
- [17] Bhudolia, Somen K., Goram Gohel, Kah Fai Leong, and Aminul Islam, "Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: A review", *Materials*, 2020, Vol.13, no.6, p.1284.
- [18] De Vries, Edgar, "*Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding*", The Ohio State University, 2004.
- [19] de Vries, E. "Development of ultrasonic welding process for stamped 6000 series Aluminum." PhD diss., Diploma Thesis, University of Applied Science, Emden, 2000.
- [20] Bakavos, D., and P. B. Prangnell, "Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet", *Materials Science and Engineering: A*, 2010, Vol.527, no.23, pp.6320-6334.
- [21] Cheng, Xudong, and Xiaochun Li, "Investigation of heat generation in ultrasonic metal welding using micro sensor arrays", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, Vol.17, no.2, p.273.
- [22] Watanabe, Takehiko, Hajime Itoh, A. Yanagisawa, and Makoto Hiraishi, "Ultrasonic welding of heat-treatable aluminium alloy A6061 sheet", *Welding International*, 2009, Vol.23, no.9, pp.633-639.
- [23] Dhara, Sisir, and Abhishek Das, "Impact of ultrasonic welding on multi-layered Al–Cu joint for electric vehicle battery applications: A layer-wise microstructural analysis", *Materials Science and Engineering: A*, 2020, Vol.791, pp.139795.

- [24] Li, Chunjie, Sansan Ao, J. P. Oliveira, Mingpeng Cheng, Zhi Zeng, Huijie Cui, and Zhen Luo, "Ultrasonic spot welded NiTi joints using an aluminum interlayer: microstructure and mechanical behavior", *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, Vol.56, pp.1201-1210.
- [25] Troughton, Michael J., "Handbook of plastics joining: a practical guide", William Andrew, 2008.
- [26] Villegas, Irene Fernandez, "Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, Vol.65, pp.27-37.
- [27] Villegas, Irene Fernandez, and Harald EN Bersee, "Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites: An investigation on energy-directing surfaces", *Advances in Polymer Technology*, 2010, Vol.29, no.2, pp.112-121.
- [28] Aliosio, C. J., D. G. Wahl, and E. E. Whetsel, "A simplified thermoviscoelastic analysis of ultrasonic bonding", *SPE Technical papers*, 1972, Vol.18, no.5, pp.28-32.
- [29] Benatar, Avraham, and Timothy G. Gutowski, "Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites", *Polymer Engineering & Science*, 1989, Vol.29, no.23, pp.1705-1721.
- [30] Benatar, Avraham, and Timothy G. Gutowski, "Method for fusion bonding thermoplastic composites", *SAMPE Q*, ; (United States), 1986, Vol.18, no.1.
- [31] Miodrag Prokic, "Piezoelectric Converters Modelling and Characterization", MPI ultrasonics, 2004.
- [32] B. U. Corporation, Ed., "Amplitude Regulation." U.S.A., 2011, <https://fliphtml5.com/xpbg/jghn/basic>
- [33] B. U. Corporation, Ed., "Amplitude Profiling™ and Weld Strength." U.S.A., 2012, <https://studylib.net/doc/18252668/amplitude-profiling---emerson-industrial-automation>.
- [34] <https://sonic-innoventor.com/wp-content/uploads/2016/05/Studies-in-Ultrasonic-welding-og-thermoplastic.pdf>
- [35] Stokes, Vijay K., "Joining methods for plastics and plastic composites: an overview", *Polymer Engineering & Science*, 1989, Vol.29, no.19, pp.1310-1324.
- [36] Andrew, William, "Handbook of Plastics Joining", *Plastics Design Library*, 1997.
- [37] Mariam, Hasetetsion G., J. Rick Baer, David J. Scholl, Ronald P. Cooper, Daniel E. Wilkosz, Anthony J. Grima, and Larry V. Reatherford, "Ultrasonic Welding of Aluminum 6111: Reliability and Maintainability Study of Robot Mounted C-Gun Welding System", In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2007, Vol.42975, pp.689-697.
- [38] Hetrick, E. T., J. R. Baer, W. Zhu, L. V. Reatherford, A. J. Grima, D. J. Scholl, D. E. Wilkosz, S. Fatima, and S. M. Ward, "Ultrasonic metal welding process robustness in aluminum automotive body construction applications", *Weld. J.*, 2009, Vol.88, no.7, pp.149-158.
- [39] "Branson ultrasonics." <https://www.emerson.com/en-ca/automation/welding-assembly-cleaning/metal-welding>.
- [40] Matheny, M., "Ultrasonic metal welding foils to tabs for lithium-ion battery cells", *Cooperative Research Program, Summary Report SR-1301, August 2012*.
- [41] Wu, Chung-Yuan, Avraham Benatar, and Abbass Mokhtarzadeh, "Comparison of ultrasonic welding and vibration welding of thermoplastic polyolefin", *welding in the World*, 2012, Vol.56, no.1, pp.69-75.
- [42] Mörschner, Rolf, and Udo Wagenbach, "Device for the ultrasonic sealing and separation of a pipe section", U.S. Patent 7,128,807, issued October 31, 2006.
- [43] Wu, Chung-Yuan, Avraham Benatar, and Abbass Mokhtarzadeh, "Comparison of ultrasonic welding and vibration welding of thermoplastic polyolefin", *welding in the World*, 2012, Vol.56, no.1, pp.69-75.

1. Brazing
2. Transducer
3. Booster
4. Horn
5. Magnetostrictive
6. Catedoinal
7. Exponential
8. Polyetherimide
9. Ball screw
10. Insert