

مروری بر فرایندهای اتصال حالت جامد مبتنی بر اصطکاک دورانی

چکیده: فناوری های اتصال و فرآوری حالت جامد در حال تبدیل شدن به یک جایگزین دایمی برای اتصال آلیاژهای نرم هستند که با روش های متداول ذوبی به سختی قابل جوشکاری هستند. با گذشت سه دهه از ابداع این روش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود را به عنوان پیشتاز در اتصال ورق های آلومینیومی با استحکام بالا معرفی نموده است که کاربرد اصلی آن ها در صنایع خودروسازی و صنایع فضایی است. همچنین این روش موفقیت نسبی در اتصال سایر آلیاژها نیز از خود نشان داده است. با توجه به موفقیت قابل توجه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، زمینه لازم برای استفاده در کاربردهای پیچیده تر و جوشکاری آلیاژهای با استحکام بالاتر فراهم شد. با این حال، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تنها فرایند موفق مبتنی بر اصطکاک دورانی نیست. در سال های اخیر جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار که روشی موفق در ترمیم آسیب های سطحی و عمقی آلیاژهای فولادی است، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در مقاله حاضر، عمده فرایندهای مبتنی بر اصطکاک دورانی در دو دسته اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار معرفی شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

واژه های راهنما: جوشکاری حالت جامد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار، اصطکاک دورانی، آلیاژهای آلومینیوم، فولاد

موسی ساجد*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،
تبریز

سیدمحمدحسین

سیدکاشی

استاد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

A review of rotary friction-based solid-state joining processes

Moosa Sajed*

Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani
University, Tabriz

**Seyed Mohammad
Hossein Seyedkashi**

Professor, Department of
Mechanical Engineering,
University of
Birjand, Birjand

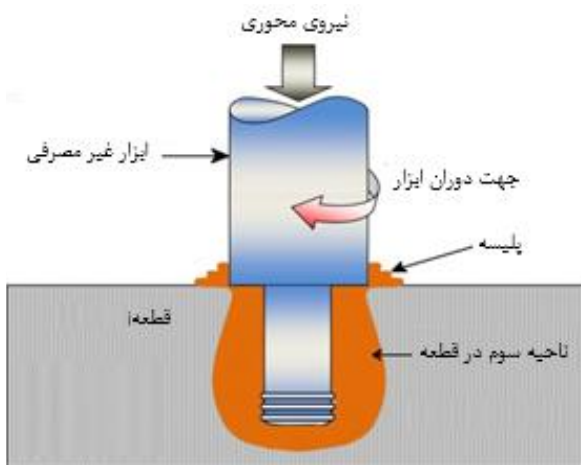
Abstract: Solid-state welding and processing methods will be an alternative to joining lightweight metals that cannot be welded using conventional fusion welding processes. After three decades after its invention, FSW is the first choice in joining high-strength aluminum alloys with an application in automotive and aerospace. The process is also capable of joining other alloys too. Due to the success of FSW, it was considered for more complicated applications and joining high-strength alloys. It should be noted that FSW is not the only successful rotary friction-based solid-state welding process. In recent years, friction hydro-pillar processing (FHPP) which is successful in repairing surface and body cracks and defects of different steel grades is also very interesting. In the present study, main rotary friction-based welding and processing methods are introduced and discussed in two major classes including friction stir welding and friction hydro-pillar processing.

Keywords: Solid-state welding, Friction stir welding, Friction hydro-pillar processing, rotary friction, aluminum alloys, Steel

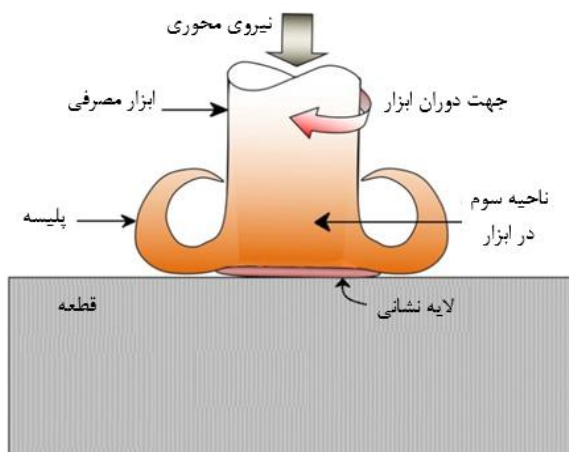
۱- مقدمه

نیکل و تیتانیوم مورد استفاده قرار گرفته است، اما به دلیل خاصیت ذوبی روش‌های ساخت افزایشی مانند استفاده از لیزر، پرتو الکترون یا قوس الکتریکی، این روش‌ها چندان برای آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم و مس مورد توجه نبوده‌اند [۴]. در این بخش به مرور روش‌های اصلاح سطح و آلیاژسازی انتخابی^۲ انجام شده تا کنون پرداخته شده است.

۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



(الف)



(ب)

شکل ۱ تشکیل ناحیه سوم در فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی.

(الف) ابزار غیرمصرفی، (ب) ابزار مصرفی [۱]

ناحیه سوم در اثر افزایش دمای ناشی از حرارت اصطکاکی بین ابزار و قطعه کار تولید می‌شود. این دما، دمایی مابین دمای تبلور مجدد و نقطه ذوب فلز است. خواص این ناحیه شامل ویسکوزیته

فناوری اصطکاکی اغتشاشی به دو دسته عمده جوشکاری و فرآوری تقسیم می‌شود. در حوزه جوشکاری بیشتر اتصال فلزات مد نظر قرار دارد؛ این در حالی است که در فرآوری افزایش کیفیت مواد به لحاظ مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مد نظر است. به طور کلی فناوری اصطکاکی اغتشاشی شامل یک ابزار دوار است که در تماس با قطعه کار حرارت لازم را برای انجام فرایند مورد نظر تولید می‌کند. این ابزار ممکن است مصرفی یا غیر مصرفی باشد. در فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی یک ناحیه سوم تشکیل می‌شود که به دلیل حرارت ورودی بالا، در عین جامد بودن قابلیت سیلان را دارد. بسته به مصرفی یا غیرمصرفی بودن ابزار، این ناحیه سوم در قطعه کار یا بر روی ابزار ایجاد می‌شود. تشکیل این ناحیه در شکل (۱ الف و ب) به ترتیب برای ابزار غیرمصرفی و مصرفی نشان داده شده است [۱].

روش‌های جوشکاری حالت جامد به دلیل مزایای ثابت شده آن‌ها نسبت به روش‌های معمول، به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. چون کل فرایند بدون ذوب کردن اتفاق می‌افتد، عیوب مربوط به فرایند انجماد کاهش یافته و حتی به طور کامل حذف می‌شود. این عیوب عبارتند از تخلخل، جدایش محلول، ترک‌های انجمادی، ترک‌های ذوبی و جذب گاز (اکثرآ هیدروژن و نیتروژن) که در این روش‌ها در محدوده جوشکاری دیده نمی‌شوند [۲].

با پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه تکنولوژی نیازهای جدیدی ظهور کرده‌اند. از جمله این نیازها می‌توان به نیاز به استفاده از آلیاژهایی را اشاره نمود که لازم است در حجم و یا سطح خود یکنواخت نبوده و مشتمل بر چند آلیاژ باشد. در واقع لازم است تا در کاربردهای خاص، آلیاژهایی بسازیم که به صورت انتخابی در قسمت‌های مختلف دارای الگوهای مشخصی باشند و درصد عناصر آلیاژی در سطح و حجم آن متفاوت باشد. استفاده از تکنولوژی لیزر یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان به این مهم در سطح قطعه دست یافت. همچنین اخیراً از روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی نیز برای این مهم استفاده شده است [۳].

روش‌های ساخت افزایشی^۱ در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است که این به دلیل مزایای آن نسبت به روش‌های متداول ساخت و تولید است. ساخت افزایشی به صورت موفقیت‌آمیزی برای ساخت شکل‌های پیچیده از آلیاژهای آهن،

² Selective alloying¹ Additive Manufacturing (AM)

حرکت دورانی و خطی ابزار منجر به حرکت مواد نرم شده از قسمت جلوی پین^۴ به پشت ابزار می‌شود. شانه ابزار با اعمال نیروی آهنگری بر مواد پشت پین باعث پرشدن حفره ناشی از حرکت پین می‌شود. این عمل بسته به دما و فشار فرایند باعث اختلاط مواد به صورت نفوذ اتمی یا ترکیب مواد می‌شود که در نهایت منجر به اتصال دو قطعه می‌گردد.

۴. مرحله خروج از قطعه و خنک کاری^۵ با رسیدن به انتهای خط جوش، ابزار از قطعه خارج می‌شود و حفره‌ای را در آن به جا می‌گذارد. فرایندهایی برای پر کردن این حفره در نظر گرفته شده است که شامل پر کردن مجدد حفره ایجاد شده یا افزایش طول خط جوش به منظور قرار گرفتن حفره در خارج از خط جوش اصلی است [۵].

وظایف اصلی ابزار تولید حرارت ناشی از تغییر شکل یا اصطکاک، کنترل سیلان مواد و نگاهداشتن مواد نرم شده زیر شانه ابزار است. در جوشکاری ورق‌های نازک عمده حرارت توسط شانه تأمین می‌شود. این در حالی است که در جوشکاری صفحات ضخیم بیشتر حرارت توسط پین تولید می‌شود. با ایجاد تغییراتی در هندسه پین یا شانه ابزار می‌توان حرارت بیشتری تولید نمود. پارامترهای اصلی جوشکاری عبارتند از سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی ابزار، عمق نفوذ شانه ابزار و زاویه ابزار. جدا از این‌ها، هندسه ابزار نیز نقش مهمی در فرایند جوشکاری دارد. سرعت دورانی و خطی میزان حرارت تولید شده و میزان تغییر شکل پلاستیک ناشی از آن و حرارت تولیدی ناشی از تغییر شکل پلاستیک را کنترل می‌کنند. این دو پارامتر در کنار میزان نفوذ شانه ابزار بر میزان فشار وارده به قطعه مؤثر هستند که به نوبه خود بر کیفیت جوش مؤثر است. به ابزار کمی زاویه داده می‌شود و شانه ابزار کمی در قطعه نفوذ داده می‌شود که هر دو این کارها به انجماد مواد در پشت پین کمک می‌کند. در حالت کلی افزایش سرعت دورانی باعث افزایش حرارت تولیدی می‌شود. این در حالی است که افزایش سرعت پیشروی به دلیل کاهش زمان در دسترس بودن حرارت، منجر به کاهش حرارت ورودی می‌شود. در حالت کلی برای دستیابی به اتصال مناسب، میزان حرارت ورودی به ناحیه جوشکاری نباید خیلی زیاد یا خیلی کم باشد [۱].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند غیرذوبی محسوب می‌شود که منجر به عدم ایجاد عیوب ناشی از انجماد که در جوشکاری‌های ذوبی اتفاق می‌افتد می‌شود. از این روش

بالا و تنش سیلان پایین است. تشکیل ناحیه سوم وجه تمایز میان فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی و فرایندهای ذوبی است. در این ناحیه امکان نفوذ بین اتمی و اختلاط بین مواد را در دماهای بالاتری ممکن می‌شود. در نتیجه مواد حاضر در این ناحیه می‌تواند اتصال مستحکمی را با مواد دیگر از یک جنس همسان یا ناهمسان تشکیل دهد. بنابراین، اصلی‌ترین هدف در فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی، ایجاد حرارت اصطکاکی مناسب است به صورتی که امکان ایجاد ناحیه سوم فراهم شود [۱]. در ادامه اهم فرایندهای اصطکاکی اغتشاشی به اختصار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انقلابی را در زمینه اتصال مواد با استحکام پایین ایجاد کرد. در این روش از دو نوع ماشین استفاده می‌شود. ماشین با کنترل فشار یا ماشین با کنترل جابجایی. شکل (۲) طرحواره این فرایند را به تصویر کشیده است. ابزار غیرمصرفی، اصلی‌ترین بخش فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که شامل یک شانه و یک پین است. انتخاب جنس و هندسه ابزار تابع جنس و هندسه قطعه کار و شرایط جوشکاری است. مراحل جوشکاری در شکل (۲) نشان داده شده است که شامل موارد زیر است:

۱. مرحله نفوذ^۱: ابزار در حالی که با یک سرعت ثابت در حال دوران است توسط یک نیروی عمودی در نقطه آغازین خط جوش در قطعه کار نفوذ می‌کند تا زمانی که شانه ابزار در تماس با سطح قطعه کار قرار گیرد. این مرحله، آغازگر فرایند تغییر شکل است.

۲. مرحله نگهداری ابزار^۲: ابزار با حفظ نیروی رو به پایین و در حالی که شانه آن در تماس با سطح قطعه کار است، بسته به جنس و ضخامت قطعه کار به مدت ۵ تا ۱۰ ثانیه دوران می‌کند. این مرحله منجر به تولید حرارت لازم برای سیلان مواد می‌شود که به نوبه خود به تولید حرارت بیشتر منجر می‌گردد. مواد نرم شده‌ای که در پیش روی ابزار قرار دارند، حرکت ملایم ابزار را در ادامه فرایند جوشکاری تضمین می‌کنند.

۳. مرحله جوشکاری^۳: ابزار دوار با شانه‌ای که حجم جوش را پوشانده است تحت فشار محوری و با پیشروی در مسیر تعیین شده اقدام به جوشکاری می‌کند. دوران ابزار با ایجاد اصطکاک و تغییر شکل به تولید حرارت ادامه می‌دهد. عملکرد مهم دیگر دوران ابزار اغتشاش یا سیلان مواد است.

⁴ Advancing side

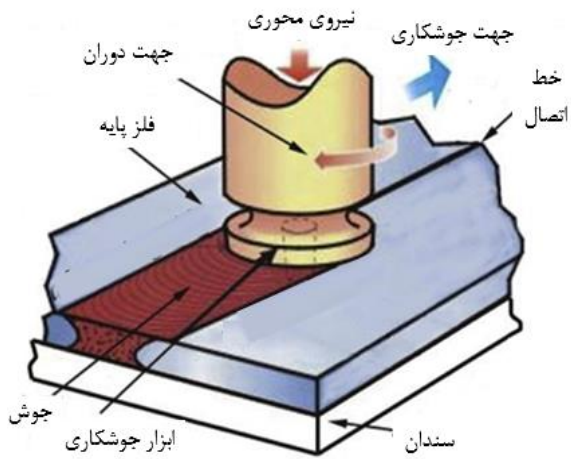
⁵ Retracting/cooling stage

¹ Plunging stage

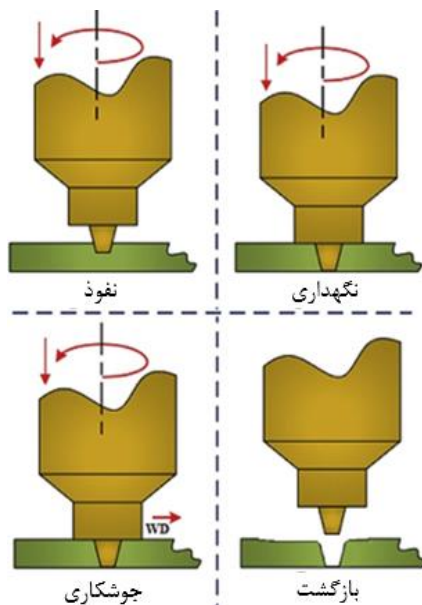
² Dwelling stage

³ Welding stage

شده و شرایط یکنواخت تری را ایجاد می کند. این روش در شکل (۳) نشان داده شده است اما به نظر می رسد در حال حاضر نمی توان از این روش برای اتصال آلیاژهای آهن و نیکل استفاده نمود [۶].



(الف)



(ب)

شکل ۲ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی. (الف) ابزار در حین جوشکاری، (ب) مراحل جوشکاری نقطه‌ای [۵]

۲-۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چرخش دوگانه معکوس

افزایش بیش از حد گرمای قطعه در جوشکاری صفحات ضخیم یک مشکل محسوب می شود که منجر به افت خواص مکانیکی

جوشکاری در مقیاس صنعتی برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده است. بر طبق مطالعات صورت گرفته، کاربرد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای منیزیم هم مقرون به صرفه است. علاوه بر این با انتخاب صحیح جنس و شکل ابزار و پارامترهای جوشکاری مناسب، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را می توان برای آلیاژهای با استحکام بالا از جمله آلیاژهای پایه آهن، پایه مس، پایه تیتانیوم و پایه نیکل نیز به کار برد. امید آن وجود دارد که این آلیاژها نیز در آینده به صورت صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژهای غیرهمجنس، کامپوزیتهای پایه فلزی، سرامیک‌ها، پلمیرها، مورد استفاده قرار گرفته است.

بازده بالای انرژی، دوستاند محیط زیست بودن و حالت جامد بودن فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ویژگی‌های جذاب فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری اتصالات اصطکاکی اغتشاشی و تعهد صنعتگران و پژوهشگران این حوزه به توسعه قابلیت اجرای این فرایند به دامنه وسیعی از مواد، منجر به توسعه گنجینه ارزشمندی از طراحی‌های ابزار، فناوری و مواد شده است. این فرایند با مشکلاتی نیز مواجه است که عبارتند از سرعت جوشکاری پایین، نیروی جوشکاری زیاد، گشتاور زیاد روی قطعه، ماشین‌آلات بزرگ، سایش ابزار، به کارگیری این روش برای مواد با استحکام بالا و غیره. برای حل این مسایل فرایند، ابزار و ماشین‌آلات مورد بازنگری قرار گرفته است. در این بخش، روش‌های نوین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از قبیل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت^۱، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چرخش دوگانه معکوس^۲، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بوبینی^۳، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوقلو^۴ و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از منبع انرژی ثانویه مورد بحث قرار گرفته است.

۱-۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت برای کاربرد در اتصال آلیاژهای پایه آلومینیوم ابداع شده است. در این روش شانه ثابت است و دوران ندارد و فقط یک حرکت لغزشی انجام می دهد. یک پین دوار که از داخل شانه رد می شود کار اتصال را انجام می دهد. ثابت بودن شانه باعث می شود که منطقه تحت تأثیر شانه کم شده و بار اصلی تولید حرارت بر دوش پین ابزار باشد که به نوبه خود منجر به از بین رفتن گرادیان دمایی شدید

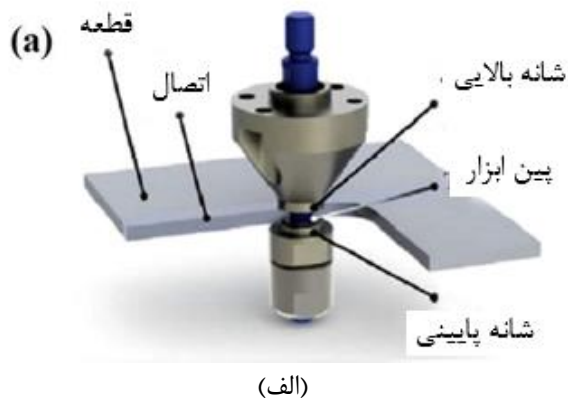
³ Bobbin tool FSW (BTFSW)

⁴ Twin tool FSW (TTFSW)

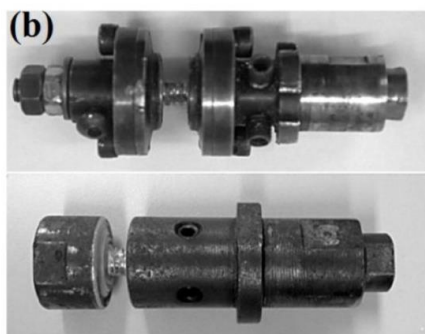
¹ Stationary shoulder FSW (SSFSW)

² Reverse dual rotation FSW (RDRFSW)

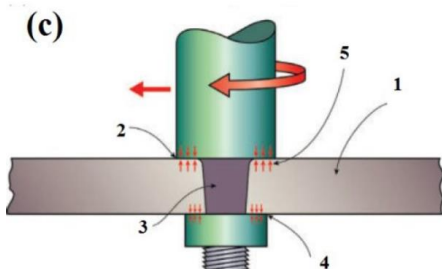
اتصال می‌شود. این مورد به دلیل اختلاف زیاد بین سرعت خطی مرکز پین و بیشترین قطر شانه ایجاد می‌شود. این مشکل را می‌توان با چرخش مستقل پین و شانه حل نمود به طوری که بتوان سرعت دورانی پین را نسبت به شانه افزایش داد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چرخش دوگانه معکوس فرایندی است که در آن پین و شانه به صورت مستقل از هم و در جهت عکس یکدیگر دوران می‌کنند. اگرچه در این روش بخشی از گشتاور کلی اعمال شده به قطعه از بین می‌رود اما قطعه را نیز می‌توان با نیروی کمتری ثابت نمود [۷].



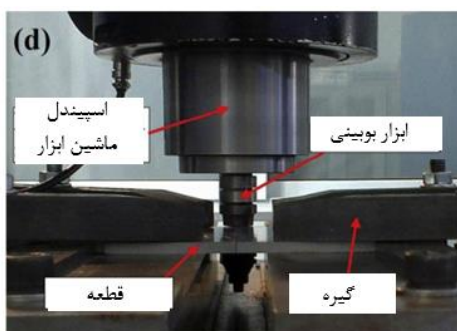
(الف)



(ب)

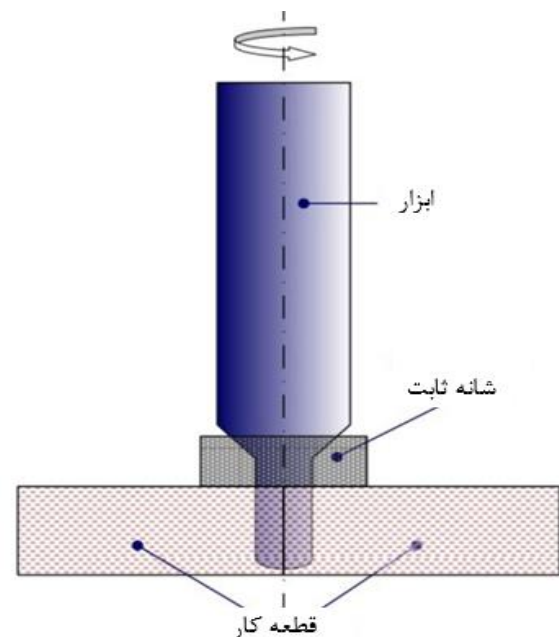


(ج)



(د)

شکل ۴ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بوبینی. (الف) فرایند استفاده از ابزار بوبینی، (ب) ابزار بوبینی، (ج) حرکت ابزار و جهت فشار به قطعه کار، (د) جوشکاری با استفاده از ابزار بوبینی [۱]



شکل ۳ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با شانه ثابت [۱]

یکی دیگر از مشکلات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تفاوت ریزساختاری بین جلوی پین و پشت آن است. با چرخش معکوس پین و شانه، این مورد تا حدود زیادی مرتفع شده و ریزساختار همگن تر می‌شود. اگرچه این روش اصلاح مناسبی از روش جوشکاری اصلی است اما مطالعات صورت گرفته در این حوزه فقط برای آلیاژهای آلومینیوم انجام پذیرفته است و کارایی آن برای سایر آلیاژها مورد مطالعه قرار نگرفته است. روش مشابه این فرایند موسوم به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو سرعت است که در آن پین و شانه به صورت مستقل از هم اما در یک جهت دوران می‌کنند. سرعت دورانی پین تأثیر زیادی در تشکیل لایه‌های پیازی و ناحیه اغتشاشی دارد. افزایش سرعت دورانی پین باعث افزایش بازدهی جوشکاری می‌شود در حالی که کاهش سرعت دورانی شانه منجر به شکل‌گیری بهتر جوش می‌شود [۷].

¹ Dual rotation speed FSW (DRSFSW)

۲-۳- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بوبینی

در این روش جوشکاری ابزار شامل دو شانه است که یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایینی با قطعه کار درگیر می‌شود. این دو شانه توسط پین به یکدیگر متصل می‌شوند. فاصله بین این دو شانه می‌تواند ثابت یا متغیر باشد. این روش جزو روش‌های خود واکنشی محسوب می‌شود. خود واکنشی بودن به این معنی است که در این روش نیازی به فشار عمودی نیست یا این نیاز بسیار کاهش یافته است [۸]. شکل (۴) جوشکاری به این روش را نشان می‌دهد. قرار گرفتن نیروهای عکس‌العمل در داخل ابزار از تغییر شکل یا شکستن پین ممانعت می‌کند. این روش بر روی آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم و آهن اعمال شده است. می‌توان با استفاده از این ابزار صفحات ضخیم را نیز جوشکاری نمود. یکی از مشکلات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده از صفحه پشت‌بند است که منجر به محدودیت کاربرد این روش به خصوص در مقاطع اکستروژن شده تو خالی می‌شود. از طرفی در صورت عدم نفوذ مناسب پین یا شانه ابزار ممکن است عیب ریشه ایجاد کند. کاربرد این ابزار نیاز به استفاده از صفحه پشت بند را از بین می‌برد و با انعطاف‌پذیری که ایجاد شده، قابلیت انجام این فرایند بر مقاطع تو خالی اکستروژن شده و مقاطع پیچیده را فراهم می‌کند. علاوه بر این، در این روش پین در کل ضخامت قطعه نفوذ می‌کند و به همین دلیل ریزساختار همگن تری را در صفحات ضخیم ایجاد می‌کند. این ویژگی جوشکاری با ابزار بوبینی که جوشکاری را از هر دو طرف به صورت همزمان انجام می‌دهد، این اطمینان را ایجاد می‌کند که در جوشکاری صفحات ضخیم عیب ریشه اتفاق نخواهد افتاد. برخی از پیشرفت‌های دیگر که مبتنی بر این روش هستند عبارتند از استفاده از ابزار دوقلوی پادچرخنده^۳ و ابزار خودنگهدار^۴ است [۸].

۲-۴- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با انرژی‌های ثانویه

در روش‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با انرژی‌های ثانویه از میدان انرژی گرمایی القا شده توسط جریان الکتریکی، لیزر، قوس یا پلاسما یا میدان انرژی مکانیکی ناشی از ارتعاشات تراسونیک استفاده می‌شود. انرژی‌های ثانویه منجر به بهبود

سیلان مواد، بازدهی فرایند، بهره‌وری و کیفیت اتصال می‌شوند. این کار از طریق تولید حرارت یا دخالت مستقیم در نرم کردن مواد (جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک) انجام می‌پذیرد [۹].

۲-۵- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، شاخه‌ای از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که برای جوشکاری ورق‌هایی با قابلیت جوشکاری پایین که روی هم قرار گرفته‌اند به کار می‌رود. این فرایند شبیه جوشکاری خطی است با این تفاوت که حرکت خطی در این روش وجود ندارد. این روش را ابتدا صنعتگران شرکت‌هایی مثل صنایع فلزات سبک سومیتومو^۵، مزدا^۶، صنایع سنگین کاوازاکی^۷ و هیدر نورسک^۸ به منظور حذف نیاز به پرچ‌کاری ابداع کردند. این روش کاربرد گسترده‌ای در جوشکاری آلیاژهای مختلف در صنایع گوناگون یافته است. در حال حاضر انواع مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل جوشکاری سنتی^۹، جوشکاری با پر کردن مجدد^{۱۰} و روش‌های بدون پین از قبیل جوشکاری با سندان دوار^{۱۱} و جوشکاری دو طرفه^{۱۲} وجود دارند. سایر روش‌های جوشکاری نقطه‌ای، روش‌های خطی با برد کوتاه هستند مانند جوشکاری دوختی^{۱۳} و جوشکاری الگویی^{۱۴} هستند.

شکل (۵ الف) مراحل جوشکاری نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در مرحله نفوذ، پین رزوه‌دار ابزار دوار وارد ورق‌هایی که روی هم قرار گرفته‌اند می‌شود. اصطکاک بین ابزار و ورق بالایی باعث تولید حرارت می‌شود، در حالی که رزوه پین باعث سیلان مواد می‌شود. با تماس شانه ابزار با ورق، نیروی فورج زیادی تولید می‌شود. در ادامه به ابزار اجازه داده می‌شود تا بیشتر در قطعه کار نفوذ کند و ممکن است قبل از خروج ابزار، به آن اجازه داده شود تا مدت کوتاهی درون قطعه کار دوران کند. این فرایند باعث تشکیل اتصال حالت جامد در سطح مشترک دو ورق می‌شود [۱۰].

در مرحله نفوذ مواد زیر پین به سمت بالا در اطراف پین اکستروژن می‌شود. این در حالی است که به دلیل تغییر شکل و نفوذ مواد

⁸ Norsk Hydro

⁹ Conventional FSSW

¹ Refill FSSW

¹ Rotating anvil FSSW

¹ Double-sided FSSW

¹ Stitch FSSW

¹ Swing FSSW

¹ Self-reacting

² Root flaw defect

³ Counter rotating twin tool

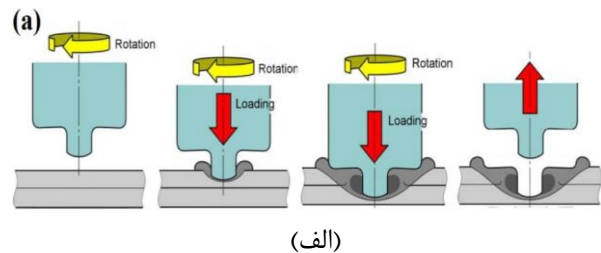
⁴ Self-supporting tool

⁵ Sumitomo Light Metal Industries, Ltd

⁶ Mazda

⁷ Kawasaki Heavy Industries, Ltd

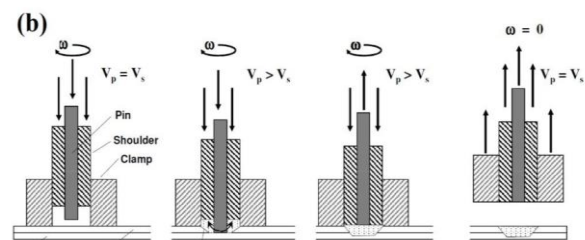
ورق‌ها حتی قبل از نفوذ ابزار در ورق پایینی، اتصال اتفاق می‌افتد. سیلان مواد شامل جابجایی افقی، عمودی و دورانی مواد است. در جوشکاری نقطه‌ای، نگهداری ابزار اجباری نیست. یکی از عیوب این روش باقی ماندن جای خالی بین ابزار پس از خروج ابزار است که می‌توان با طراحی ابزار خاص یا فرایند تکمیلی این سوراخ را از بین برد.



(الف)

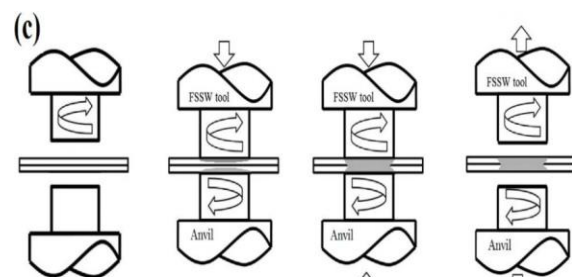
فضای کافی برای موادی که در این مرحله با ورود پین به قطعه- کار جابجا می‌شوند را فراهم کند. پس از نگهداری پین در قطعه- کار، پین از قطعه خارج شده و شانه به سطح قطعه نزدیک می‌شود. این کار باعث بازگرداندن مواد به داخل سوراخ می‌شود. وقتی پین به طور کامل داخل شانه قرار گرفت به معنی اتمام فرایند است. این یکی از روشهای ایجاد جوش نقطه‌ای بدون حفره است. روشهای متنوعی در این حوزه معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱].

ابزارهای بدون پین جزو انواع کم هزینه جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی هستند. عدم استفاده از پین، جوشکاری را محدود به ضخامت یک میلیمتر می‌کند. برای پوشش این مشکل از جوشکاری دو طرفه که در شکل (۵ ج) نشان داده شده است استفاده می‌شود تا بتوان ورق‌های ضخیم‌تری را جوشکاری نمود. در این روش دو ابزار بدون پین، یکی از بالا و یکی از پایین، عمل ایجاد اصطکاک دورانی و اعمال نیروی فورج را انجام می‌دهند که منجر می‌شود مواد هم در ورق پایینی و هم در ورق بالایی نرم شده و سیلان پیدا کنند و در سطح مشترک دو ورق به هم رسیده و اتصال را ایجاد کنند. شکل (۶) جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با برد کوتاه را نشان می‌دهد. در این روش‌ها ابزار پس از انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای تحت یک الگوی مشخص (دایره یا مربع) حرکت می‌کند (جوشکاری الگویی) یا زاویه گرفته و حرکت می‌کند (جوشکاری دوختی) تا طول اتصال را بین ۵ تا ۱۸ میلیمتر افزایش دهد. این روش‌ها برای کاربرد در ربات‌ها ایجاد شده است. این کار منجر به افزایش استحکام اتصالات نسبت به جوشکاری نقطه‌ای معمول می‌شود.



(ب)

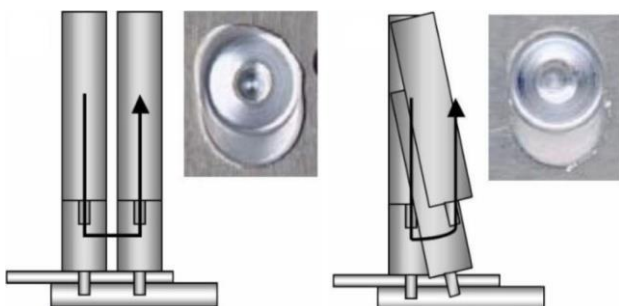
با انتخاب صحیح جنس ابزار، هندسه ابزار و پارامترهای فرایند می‌توان روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را به دامنه وسیعی از آلیاژهای آهنی و غیرآهنی و پلیمرها اعمال نمود. ترکیب این فرایند با رباتیک در بسیاری از صنایع همچون صنایع خودروسازی، هوافضا و فلزکاری برای تولید انبوه به کار گرفته شده است [۱].



(ج)

شکل ۵ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (الف) با استفاده از ابزار ساده، (ب) با استفاده از ابزار پرکننده، (ج) با استفاده از ابزار بدون پین دو طرفه [۱]

جوشکاری با پر کردن مجدد روشی برای تولید اتصالات نقطه‌ای بدون باقی ماندن سوراخ ناشی از پین است که در شکل ۵ ب نشان داده شده است. ابزار این مجموعه شامل پین، شانه و حلقه نگهدارنده است که هر کدام به صورت مستقل عمل می‌کنند. در طی جوشکاری، ابتدا حلقه نگهدارنده دو ورق را نگه می‌دارد. سپس در حالی که پین عقب نگه داشته شده است، شانه دوار با سطح ورق بالایی در تماس قرار می‌گیرد. این اصطکاک منجر به تولید حرارت در سطح مشترک شانه و ورق فوقانی می‌شود. پس از تولید حرارت مناسب، شانه به عقب برمی‌گردد تا



شکل ۶ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با برد کوتاه [۱]

۲-۶- پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی

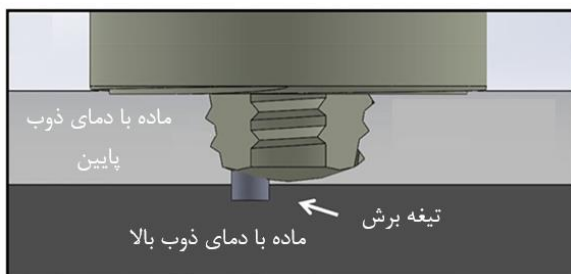
پرچکاری یکی از فرایندهای اتصال مکانیکی پذیرفته شده در سطح جهان است. این روش با موفقیت بر روی آلیاژهای دارای استحکام بالا اعمال می‌شود. اما در اتصال آلیاژهای سبک مثل آلومینیوم با استفاده از این روش هنوز مشکلاتی وجود دارد. با پیشرفت فناوری‌های حالت جامد، امکان طراحی بر مبنای آلیاژهای سبک فراهم آمده است.

روش‌های حالت جامد مثل فرآوری اصطکاکی هیدروپیلار^۱، جوشکاری اصطکاکی با پیچ مخروطی^۲، پرچکاری خود سوراخکار^۳ و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای روش‌های مناسبی برای اتصال آلیاژهای سبک هستند. اما این فرایندها معایبی دارند که از جمله آن‌ها نیاز به سوراخکاری اولیه و عدم اتصال متالورژیکی بین ورق‌ها است که اتصال را محدود به اتصال مکانیکی می‌کند. این نوع از اتصالات در اثر تغییر شکل ورق پایینی در ناحیه پرچکاری دچار شکست می‌شوند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای این مسئله را حل می‌کند اما به دلیل باقی ماندن سوراخ ناشی از پین در محل جوشکاری که منجر به الزام به انجام عملیات اضافی به منظور از بین بردن این سوراخ می‌شود، هزینه اتصال افزایش می‌یابد. به منظور از بین بردن مشکلات بالا و در عین حال کاهش هزینه‌ها، در سال‌های اخیر روش‌هایی تحت عنوان پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی^۴ توسعه داده شده‌اند.

بر طبق تعریف هر فرایند حالت جامدی را که در آن یکی از طرف‌های فرایند (معمولا ابزار غیرمصرفی یا مصرفی) دوران داشته باشد را می‌توان فرایند اصطکاکی اغتشاشی دانست. بر طبق این معیار فرایندهای پرچکاری متفاوتی ابداع شده‌اند که عبارتند از: پرچکاری اصطکاکی^۵، پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی کور^۶، پرچکاری با سوراخکاری اصطکاکی دوار^۷ و پرچکاری اصطکاکی خود سوراخکار^۸ علاوه بر این‌ها، اخیرا روش جدیدی در دانشگاه تولندو^۹ ابداع شده که روش پرچکاری اصطکاکی خود سوراخکار و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را در هم ادغام می‌کند. این روش پرچکاری اصطکاکی اغتشاشی نامیده می‌شود. در این روش با استفاده از دستگاهی که حرکت دورانی را تامین کند، پرچ تا عمق معینی درون ورق‌هایی که روی هم قرار گرفته‌اند تا عمق از پیش تعیین شده وارد می‌شود [۱].

۲-۷- حکاکی اصطکاکی اغتشاشی

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سنتی، جوشکاری آلیاژهایی که بیش از ۲۰ درصد در دمای ذوب متفاوت هستند و آنهایی که بیش از ۱۰ درصد در چگالی متفاوت هستند مشکل است. ماده نرم‌تر در این حالت بسیار سریعتر از ماده سخت‌تر سیلان یافته و از ناگت دور می‌شود که منجر به ایجاد اتصال ضعیف می‌گردد. علاوه بر این تشکیل لایه سخت بین فلزی در محل تماس دو آلیاژ یک مشکل محسوب می‌شود. حکاکی اصطکاکی اغتشاشی^{۱۰} روشی است که اخیرا برای اتصال ورق‌های با ترکیب شیمیایی متفاوت یا با اختلاف دمای ذوب زیاد به کار گرفته می‌شود. در این روش همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است علاوه بر پین، از یک زایده که از مرکز ابزار فاصله دارد استفاده می‌شود. در این روش ماده نرم‌تر بالا قرار داده می‌شود و این زایده به اختلاط بهتر ماده سخت‌تر زیری کمک می‌کند. جنس این زایده بایستی دارای استحکام و سختی بالاتر نسبت به مواد ورق‌ها باشد. حضور زایده در ابزار جوشکاری منجر به ایجاد یک اتصال مکانیکی بین دو ورق ناهمگون می‌شود که اتصال آن‌ها را تسهیل می‌کند. میزان نفوذ زایده در ورق پایینی کمتر از یا برابر طول زایده است. حرکت چرخشی ابزار منجر می‌شود تا زایده بتواند حفره‌ای را که قطر آن حداکثر دو برابر فاصله زایده از مرکز ابزار است ایجاد کند. این حفره توسط مواد اکستروژده شده از ورق بالایی پر شده و منجر به ایجاد اتصالی با استحکام برشی بالا بین دو ورق می‌شود. بدون حضور این زایده، لازم خواهد بود تا پین ابزار عمق بیشتری را در آلیاژ سخت نفوذ کند. برای سیلان ماده سخت‌تر باید از سرعت‌های دورانی بالاتر به منظور دستیابی به حرارت اصطکاکی مناسب استفاده شود که منجر به سایش ابزار می‌شود [۱۲].



شکل ۷ حکاکی اصطکاکی اغتشاشی [۱۲]

⁶ Friction stir blind riveting (FSBR)

⁷ Rotation friction drilling riveting (RFDR)

⁸ Friction self-piercing riveting (FSPR)

⁹ University of Toledo

¹ Friction stir scribe (FSS)

¹ Friction hydro pillar processing (FHPP)

² Friction taper stud welding (FTSW)

³ Self piercing riveting (SPR)

⁴ Friction stir riveting (FSR)

⁵ Friction riveting (FR)

۲-۸- آلیاژسازی سطحی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی

روش‌های متنوعی برای اصلاح سطح فلزات و آلیاژهای مختلف به کار گرفته شده است. از آنجمله می‌توان به استفاده از کامپوزیت‌های پایه فلزی^۱، اسپری پلاسما^۲، اسپری حرارتی^۳، پوشش‌دهی الکتروود^۴ و آندسازی سخت^۵ اشاره نمود [۱۳].

یکی از روش‌های پرکاربرد در اصلاح سطح و آلیاژسازی سطحی استفاده از تکنولوژی لیزر^۶ است. واحد سیگنال برای مدولاسازی پرتو لیزر از حالت پالسی به موجی ممتد استفاده می‌کند. با استفاده از یک بازتاب‌دهنده، نور لیزر به سطح قطعه تابانده می‌شود. حرکت‌های قطعه را می‌توان با استفاده از واحد کنترل، کنترل نمود. برای تولید آلیاژ، عناصر آلیاژی به شکل پودر یا سیم به حوضچه مذاب اضافه شده^۷ و تحت تأثیر حرارت ناشی از باریکه لیزر ذوب می‌شوند و با فلز پایه ایجاد پیوند متالورژیکی می‌کند. اگرچه روش‌های دیگری شامل آلیاژسازی جایگزینی^۸ و آلیاژسازی گازی^۹ نیز وجود دارد [۱۳].

یکی از روش‌های موفق پوشش‌دهی حالت جامد استفاده از اسپری سرد^{۱۰} است که برای تولید انبوه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند در حال حاضر به عنوان فرایندی کارآمد برای ساخت افزایشی نیز شناخته می‌شود.

فرایند اسپری سرد در دهه ۸۰ میلادی در روسیه معرفی شد. در این فرایند با استفاده از جت مافوق صوت هوای فشرده، ماده در معرض جریان پرسرعتی (۳۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بر ثانیه) از ذرات فلزی کوچک در دمایی پایین‌تر از دمای ذوب ماده قرار می‌گیرد [۴].

اخیراً از فرایند اصطکاکی اغتشاشی نیز برای آلیاژسازی انتخابی استفاده شده است. در این روش یک محفظه در سطح قطعه برای قرار گرفتن پودر مربوط به عنصر آلیاژی مربوطه ماشینکاری شده و و پس از قرار گرفتن پودر در این محفظه با استفاده از یک ابزار بدون پین سطح محفظه بسته شده و سپس با استفاده از ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این پودر در ناحیه اغتشاشی پخش می‌شود. با افزایش تعداد پاس می‌توان به یکنواختی لازم در ناحیه اغتشاشی دست یافت [۳].

از زمان معرفی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اوایل دهه ۹۰ میلادی، آلیاژسازی سطحی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد توجه بوده است. محققین فراوانی در این حوزه به بررسی این فرایند پرداخته‌اند. کین و همکاران با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت دورانی بالا به تولید آلیاژ منیزیم قابل تجزیه پرداخته‌اند. نتایج کار ایشان به این شرح است: سرعت دورانی بالا با افزایش قابلیت شکل‌پذیری و قابلیت سیلان ماده از ایجاد عیوب ماکروسکوپی در ناحیه اغتشاشی جلوگیری می‌کند. همچنین توصیه می‌شود که از یک پاس دوم برای افزایش میزان همگن بودن توزیع استفاده شود. ریزدانه‌تر شدن در کنار شکسته شدن دندریت‌ها و رسوب ذرات فاز ثانویه منجر به خوردگی یکنواخت‌تری در سطوح فرآوری شده می‌شود. مقاومت خوردگی بالا در قطعات فرآوری شده به صورت اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به ریزتر شدن دانه‌ها و انرژی سطحی کم مرتبط دانست [۱۴].

پردازش سطح به روش اصطکاکی اغتشاشی^{۱۱} یکی از فرایندهای مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که برای بهبود خواص سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد. مانه و هوسمانی [۱۵] افزایش سختی آلیاژ قابل عملیات حرارتی Al6061 با استفاده از ترکیب روش‌های اسپری گرم^{۱۲}، پردازش سطحی اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی را مورد بررسی قرار داده است. دستیابی به ناحیه اغتشاشی بدون عیب در سرعت پیشروی پایین ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و افزایش عرض پروفیل سختی با افزایش سرعت دورانی ابزار از جمله نتایج اعلام شده توسط ایشان است. سانتوز و همکاران [۱۶] از ایجاد تغییر چهار درصدی در رسانش الکتریکی آلومینیوم در اثر انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی خبر داده‌اند.

در کامپوزیت‌های هیبریدی از چند عنصر تقویت‌کننده به صورت همزمان استفاده می‌شود. عظیمی و همکاران [۱۷] ابتدا به صورت مکانیکی پودر هماتیت^{۱۳} و آلومینیوم را مخلوط نموده‌اند و در ادامه با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به تولید نانوکامپوزیت هیبریدی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ پرداخته‌اند. تفاوت کار ایشان با کارهای مشابه، استفاده از دو پودر تقویت‌کننده به صورت همزمان است. طبق مشاهدات ایشان،

⁸ Replaced feeding

⁹ Surface gas alloying

¹ Cold Spray (CS)

¹ friction stir surface processing (FSSP)

¹ Thermal spray

¹ Hematite (Fe₂O₃)

¹ Metal matrix composites

² Plasma spraying

³ Thermal spraying

⁴ Electroplated coating

⁵ Hard anodizing

⁶ Laser surface alloying

⁷ Synchronous feeding

پیشرفت سریع جوشکاری اصطکاکی توجه ها را به روش جدیدی از تکنولوژی‌های جوشکاری و تعمیر به نام جوشکاری اصطکاکی الگویی^۵ جلب کرده است. فرایند اصطکاکی هیدروپیلار^۶ اصول این جوشکاری را در خود دارد. پایش این روش سخت است چرا که این روش شامل دوران یک میله در یک سوراخ کور است. پارامترهای مهم در این فرایند عبارتند از سرعت دورانی، میزان تغذیه محوری (مقدار سوختن ابزار) و فشار محوری. با توجه به نحوه تغییرات فشار محوری در حین فرایند می‌توان این فرایند را به چهار مرحله تغذیه محوری، پرس، جوشکاری و فورج تقسیم‌بندی نمود [۲۱]. می‌توان از فرایند اصطکاکی هیدروپیلار برای پرکردن ترک های سطحی و زیرسطحی در مخازن فولادی جدار ضخیم، ترک های سطحی روتور توربین بخار از جنس فولاد استحکام بالا و مقاوم در برابر حرارت استفاده نمود. روش‌های ذوبی جایگزین، در عمل منجر به ایجاد مشکلاتی می‌شود که این به دلیل قابلیت سخت‌شوندگی این آلیاژها و اجبار به استفاده از حرارت‌دهی قبل از جوشکاری و عملیات حرارتی پس از جوشکاری است. عیوب مربوط به این فرایند وجود حباب هوا و عدم پرشدن انتهای ترک است که به دلیل عدم ایجاد حرارت کافی و نیروی ناکافی محوری ایجاد می‌شود [۲۲].

۳-۱- مطالعات انجام شده بر روی جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار

لی و همکاران [۴] بر اساس مدل ساخته شده برای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مدلی برای شبیه‌سازی فرایند اصطکاکی هیدروپیلار ارائه کرده‌اند. ایشان حرکت و تغییرشکل لایه مشترک اصطکاکی^۷ را شبیه‌سازی نموده و مکانیزم مربوطه را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین از این شبیه‌سازی برای پیش‌بینی ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت^۸ استفاده نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند که روش مش دینامیکی^۹ را می‌توان برای توصیف تغییرشکل مداوم فصل مشترک اصطکاکی به کار برد. سوئی و همکاران [۲۳] می‌نویسند که چهار پارامتر اصلی در این فرایند وجود دارند که عبارتند از سرعت دورانی، نیروی فشاری، نیروی فورج و میزان سوخت. سرعت دورانی، اصطکاک

سختی و استحکام کششی در نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه فرآوری شده بدون استفاده از پودر تقویتی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

۳- جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار

فرایند اصطکاکی اغتشاشی هیدروپیلار، در دهه ۹۰ میلادی توسط TWI^۱ ابداع شده است. این فرایند شامل یک ابزار مصرف-شدنی به شکل استوانه یا مخروط است که به صورت محوری به سمت حفره‌ای که از قبل ساخته شده است هدایت می‌شود که در شکل (۸) نشان داده شده است. تماس ایجاد شده بین میله و حفره باعث تولید حرارت در اثر اصطکاک می‌شود. نیروی محوری اعمالی و دوران میله با نرم کردن مواد باعث سیلان مواد می‌شود تا حفره پر شود. به دلیل تغییرشکل زیادی که مواد تجربه می‌کنند، در زمان کوتاهی اتصال بین دیواره حفره و مواد میله اتفاق می‌افتد. معمولاً این زمان کمتر از یک دقیقه است که به میزان زیادی به ماده مورد استفاده، سرعت دورانی، نیروی محوری و پارامترهای هندسی وابسته است [۲].

در سال ۱۹۹۲، موسسه جوشکاری TWI یک روش جوشکاری حالت جامد جدید به نام جوشکاری اصطکاکی با میله مخروطی^۲ را برای انجام کارهای تعمیراتی در زیر آب ابداع نموده است. در طی این فرایند از اصطکاک بین یک میله دوار با سر مخروطی در یک شیار برای ایجاد حرارت اصطکاکی و سیلان پلاستیکی مواد استفاده می‌شود و در نهایت از یک نیروی فورج که توسط میله اعمال می‌شود، استفاده می‌شود. این نیروی فورج نهایی به منظور نگه داشتن میله داخل سوراخ و اصلاح بیشتر مواد با استفاده از تغییرشکل پلاستیک، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]. این روش بر پایه فرایند اصطکاکی هیدروپیلار^۳ ابداع شده و شکل مربوط به آن در شکل (۹) نشان داده شده است [۱۹]. تفاوت عمده بین این روش و روش هیدروپیلار در شکل میله مورد استفاده است. در تعمیر ترک‌هایی با طول بیشتر از روشی موسوم به جوشکاری اصطکاکی الگویی^۴ استفاده می‌شود که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این روش، از چندین جوش هیدروپیلار کنار هم که با هم همپوشانی دارند استفاده می‌شود [۲۰].

⁶ Friction hydro pillar processing (FHPP)

⁷ Friction interlayer (FI)

⁸ Heat affected zone (HAZ)

⁹ The dynamic mesh method

¹ The welding institute

² Friction taper plug welding (FTPW)

³ Friction hydro pillar processing (FHPP)

⁴ Friction stitch welding

⁵ Friction stitch welding

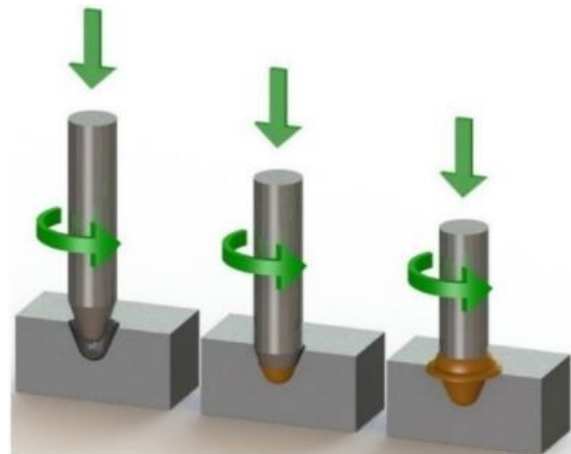
فولاد ضدزنگ از ورق به ضخامت ۳۰ میلی‌متر و میله به ضخامت ۲۵/۴ میلی‌متر استفاده نموده است. قبل از انجام فرایند در سطح قطعه، شیاری به عمق ۲۰ میلی‌متر با زاویه ۳۰ درجه ایجاد شده است و میله نیز با زاویه ۲۰ درجه به شکل مخروط درآمده است. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده، سرعت دورانی ۱۵۵۰ دور در دقیقه، ۱۲ میلی‌متر طول سوخت است. کانان و همکاران [۲۲] فرایند اصطکاکی هیدروپیلار را بر روی آلیاژ پرکربن AISI 4140 پیاده نموده و نتیجه گرفته‌اند که با نیروهای محوری کمتر و زمان بیشتر فرایند، پر شدن ترک بهتر اتفاق می‌افتد و اتصالی بدون عیب ایجاد می‌شود. در این مطالعه همچنین از شبیه‌سازی به منظور بررسی سیکل حرارتی استفاده شده است. خیونگ و همکاران [۲۴] جوشکاری آلیاژ X52 را مطالعه نموده‌اند. چلودزینسکی و همکاران [۲۵] با انجام آزمایش‌های جابجایی باز شدن نوک ترک^۲ به بررسی چقرمگی آلیاژهای فولاد کربن-منگنز پرداخته‌اند. در این مقاله از یک ورق ۳۰ میلی‌متری استفاده شده است. متر و بارکی [۲۶] رفتار خستگی را در جوشکاری با استفاده از میله پر کننده^۳ آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم ۲۱۹۵ بررسی نموده‌اند.

۲-۳- جوشکاری زیر آب

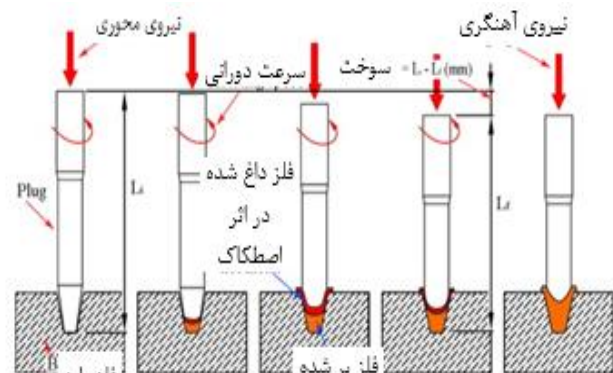
به دلیل شرایط خاص محیطی، معمولاً در مواد استفاده شده برای خطوط لوله و سازه‌های زیر آب، مشکلاتی دیده می‌شود. فرایند انجام تعمیرات در زیر آب دو مشکل عمده دارد که اولی شرایط کاری نامناسب در زیر آب و دومی سخت بودن فرایند جوشکاری در محیط مرطوب است. تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است تا با بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی الکتروود و تجهیزات جوشکاری، این شرایط بهبود یابد. اما با توجه به تغییراتی که هر روز در صنایع دریایی نفت و گاز ایجاد می‌شود، نیاز به طراحی روش‌های نوین جوشکاری و تعمیر بیش از پیش احساس می‌شود [۱۸]. یکی از مزایای عمده جوشکاری با میله مخروطی در زیر آب این است که کیفیت جوش مستقل از عمق آب است و این موردی است که امکان استفاده از این روش را در عمق زیاد دریا ممکن می‌کند [۲۷].

امروزه یک و گول [۲۸] در قالب یک طرح اروپایی که موضوع آن ایجاد انشعاب از لوله‌های نفت و گاز عبوری از کف دریا در چین کار است، اقدام به بررسی جوشکاری فولاد در زیر آب با استفاده از فرایند اصطکاکی هیدروپیلار پرداخته‌اند. جوشکاری

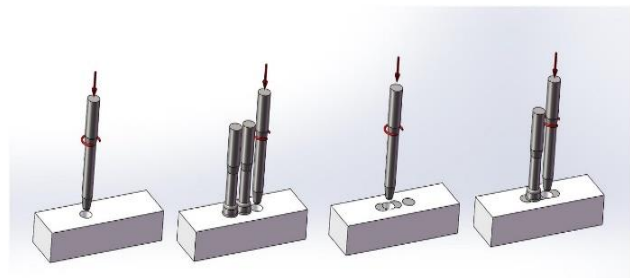
لازم را برای تولید حرارت ایجاد می‌کند. هرچه سرعت دورانی بیشتر باشد، حرارت نیز بیشتر است. همچنین سرعت دورانی بالاتر امکان تشکیل عیوب در حین جوشکاری را کاهش داده و در عین حال باعث کاهش سختی و استحکام جوش نیز می‌شود.



شکل ۸ فرایند اصطکاکی هیدروپیلار [۲]



شکل ۹ جوشکاری اصطکاکی با میله مخروطی [۱۸]



شکل ۱۰ جوشکاری اصطکاکی الکتریکی [۲۰]

لی و همکاران [۲۱] این فرایند را با استفاده از فولاد Q325 انجام داده‌اند. مین‌هارد و همکاران [۲] در جوشکاری یک آلیاژ

³ Friction plug welding

¹ UNS S31803 DSS

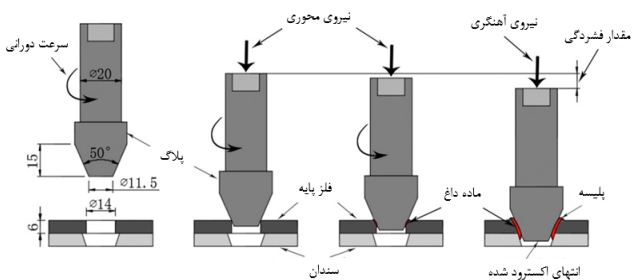
² Crack tip opening displacement (CTOD)

(۱۳) نحوه انجام فرایند و پارامترهای هندسی مورد استفاده را نشان می‌دهد. نکته مهم در این فرایند انتهای باز سوراخ ایجاد شده است که به منظور اطمینان از خروج قسمتی از آلومینیوم که در اثر حرارت ایجاد شده کیفیت خود را از دست می‌دهد الزامی است.

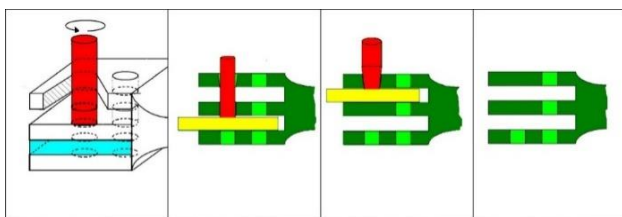
هاتینگ و همکاران [۳۵] به بررسی کاربرد روش اصطکاکی هیدروپیلار و جوشکاری با میله مخروطی برای تعمیر سوراخ‌های پره توربین پرداخته است. شکل (۱۴) استفاده از این روش برای انجام این کار را نشان می‌دهد. مشکلاتی از قبیل ایجاد ترک شعاعی، بیضی شدن مقطع سوراخ و عدم هم‌راستایی سوراخ‌ها ممکن است در حین سوراخ‌کاری حادث شود. با استفاده از فرایند هیدروپیلار می‌توان سوراخ‌های معیوب را پر نموده و مجدداً فرایند را انجام داد.



شکل ۱۲ ابزار جوشکاری نقطه‌ای پرکننده [۳۲].



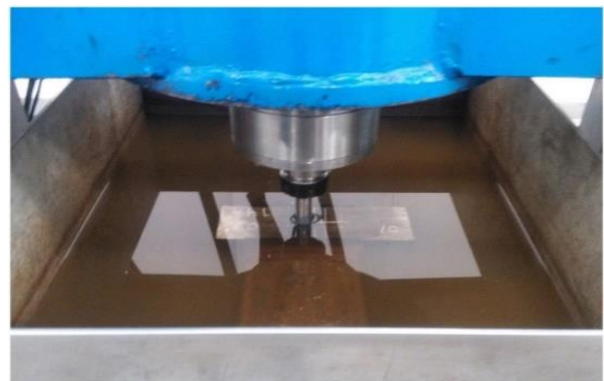
شکل ۱۳ نحوه انجام فرایند و پارامترهای هندسی برای آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ [۳۳]



شکل ۱۴ تعمیر سوراخ‌های پره توربین با استفاده از روش اصطکاکی هیدروپیلار [۳۵]

فولاد خطوط لوله X65 در زیر آب مورد مطالعه قرار گرفته است اما به دلیل نرخ بالای خنک‌کاری، ریزساختار کاملاً مارتزیتی به دست آمده است [۲۹]. جوشکاری زیر آب فولاد ضد زنگ نیز مورد اشاره قرار گرفته است [۳۰].

خیونگ و همکاران [۲۴] جوشکاری زیر آب را برای لوله فولادی کم آلیاژ X52، مورد مطالعه قرار داده‌اند. تنگ و همکاران [۲۰] از فرایند اصطکاکی دوختی برای تعمیر قطعات جوشکاری قوسی شده از جنس آلیاژ DH36 استفاده نموده‌اند. شکل (۱۱) این فرایند را نشان می‌دهد. کار مشابهی توسط وانگ و همکاران [۳۱] نیز کار مشابهی را به انجام رسانیده‌اند.



شکل ۱۱ فرایند اصطکاکی دوختی زیر آب [۲۰]

۳-۳- فرایندهای مشابه و کاربرد صنعتی

فرایند اصطکاکی اغتشاشی هیدروپیلار چون ذاتاً برای تعمیر ترک‌های ایجاد شده در قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، عموماً میله و ورق هر دو از یک جنس انتخاب می‌شوند. با این حال در یک سری از مطالعات نیز از آلیاژهای متفاوت استفاده شده است. یین و همکاران [۳۰] از میله از جنس فولاد ضد زنگ 316L برای جوشکاری ورق از جنس فولاد Q345 استفاده نموده‌اند. هان و همکاران [۳۲] در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با استفاده از روشی مشابه با روش هیدروپیلار به تولید اتصال بدون حفره پرداخته‌اند. در عین حال ایشان به این منظور از دو آلیاژ متفاوت آلومینیوم استفاده کرده‌اند. آن‌ها از میله‌ای از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، برای پرکردن حفره باقی مانده در جوشکاری ورق‌هایی از جنس آلومینیوم ۲۲۱۹ استفاده نموده‌اند. شکل (۱۲) ابزار مورد استفاده در این فرایند را نشان می‌دهد. ژانگ و همکاران [۲۷] در جوشکاری آلیاژ S355 از دو میله از جنس-های S355 و LF2 استفاده نموده‌اند.

دو و همکاران [۳۳ و ۳۴] فرایندی مشابه فرایند اصطکاکی هیدروپیلار را بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ پیاده نموده‌اند. شکل

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر عمده روش های جوشکاری و فراوری حالت جامد مبتنی بر اصطکاک دورانی در دو بخش اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری اصطکاکی هیدروپیلار معرفی شده و مطالعات صورت گرفته در این حوزه به اختصار مورد بررسی قرار داده شد. با توجه به جدید بودن این فرایندها و معرفی فرایندهای بیشتر که توسط محققین این حوزه انجام می شود، لازم است تا مطالعات بیشتری با استفاده از آلیاژها و پودرهای مختلف و محدوده وسیع تری از پارامترها انجام شوند تا تمام جوانب این فرایندها روشن شود. همچنین به دلیل مشکلات موجود در پایش برخط این فرایندها، شبیه سازی می تواند اطلاعات مفیدی را در پی داشته باشد. در زیر پیشنهاداتی برای پژوهش در این حوزه ارائه می شود:

۱. مطالعه آلیاژسازی به روش اصطکاکی هیدروپیلار با استفاده از پودرهای نانو.

۲. امکان سنجی ارائه روشی به منظوری کاهش گرادیان سختی بین ناحیه جوش و فلز پایه در اتصالات هیدروپیلار.

۵- مراجع

- [6] Ahmed, M.M.Z., Wynne, B.P., Rainforth, W.M., and Threadgill, P.L., Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium, *Scripta Materialia*, Vol. 64(1), pp. 45-48, (2011).
- [7] Shi, L., Wu, C.S., and Liu, H.J., The effect of the welding parameters and tool size on the thermal process and tool torque in reverse dual-rotation friction stir welding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 91, pp. 1-11, (2015).
- [8] Sued, M.K., Pons, D., Lavroff, J., and Wong, E.H., Design features for bobbin friction stir welding tools: Development of a conceptual model linking the underlying physics to the production process, *Materials and Design (1980-2015)*, Vol. 54, pp. 632-643, (2014).
- [9] Padhy, G.K., Wu, C.S., and Gao, S., Auxiliary energy assisted friction stir welding—status review, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20(8), pp. 631-649, (2015).
- [10] Sajed, M., and Bisadi, H., Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys, *Welding in the World*, Vol. 60(1), pp. 33-40, (2016).
- [11] Sajed, M., Parametric study of two-stage refilled friction stir spot welding, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp. 307-317, (2016).
- [12] Upadhyay, P., Hovanski, Y., Jana, S., and Fifield, L.S., Joining dissimilar materials using friction stir scribe technique, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139(3), pp. 034501, (2017).
- [13] Chi, Y., Gu, G., Yu, H., and Chen, C., Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review., *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 100, pp. 23-37, (2018).
- [14] Qin, D., Shen, H., Shen, Z., Chen, H., and Fu, L., Manufacture of biodegradable magnesium alloy by high speed friction stir processing, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 36, pp. 22-32, (2018).
- [15] Mane, K.M., and Hosmani, S.S., Friction stir surface processing of Al 6061 alloy: role of surface alloying with copper and heat-treatment, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 71(6), pp. 1411-1425, (2018).
- [16] Santos, T.G., Miranda, R.M., Vilaça, P., and Teixeira, J.P., Modification of electrical conductivity by friction stir processing of aluminum alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57(5), pp. 511-519, (2011).
- [1] Padhy, G.K., Wu, C.S., and Gao, S., Friction stir based welding and processing technologies—processes, parameters, microstructures and applications: A review, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 34(1), pp. 1-38, (2018).
- [2] Meinhardt, C.P., Chludzinski, M., Ribeiro, R.F., Rocha, C.L.F., Santos, A.C.S., and Strohaecker, T.R., Evaluation of friction hydro-pillar processing welding in duplex stainless steels (UNS S31803), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 246, pp. 158-166, (2017).
- [3] Karthik, G.M., Ram, G.J., and Kottada, R.S., Friction stir selective alloying, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 684, pp. 186-190, (2017).
- [4] Li, W., Yang, K., Yin, S., Yang, X., Xu, Y., and Lupoi, R., Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review, *Journal of materials science and technology*, Vol. 34(3), pp. 440-457, (2018).
- [5] Zhong, Y.B., Wu, C.A. and Padhy, G.K., Effect of ultrasonic vibration on welding load, temperature and material flow in friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 239, pp. 273-283, (2017).

- International journal of fatigue*, Vol. 43, pp. 178-187, (2012).
- [27] Zhang X., Deng, C., Wang, D., Wang, Z., Teng, J., Cao, J., Xu, W., and Yang, F., "Improving bonding quality of underwater friction stitch welds by selecting appropriate plug material and welding parameters and optimizing joint design," *Materials and Design*, Vol. 91, pp. 398-410, (2016).
- [28] A. Ambroziak and B. Gul, "Investigations of underwater FHPP for welding steel overlap joints," *Archives of civil and mechanical engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 67-76, 2007.
- [29] Y. Yin, X. Yang, L. Cui, F. Wang, and S. Li, "Material flow influence on the weld formation and mechanical performance in underwater friction taper plug welds for pipeline steel," *Materials and Design*, Vol. 88, pp. 990-998, (2015).
- [30] Yin, Y., Yang, X., Cui, L., Cao, J., and Xu, W., "Microstructure and mechanical properties of underwater friction taper plug weld on X65 steel with carbon and stainless steel plugs", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 21, No. 4, pp. 259-266, (2016).
- [31] Wang, Z., Teng, J., Wang, T., Cui, L., Liu, H., Yang, J., Zhang, Y., and Zhu, H., "Observations of repair process by friction stitch welding in simulated wet conditions-Flaws, microstructure and hardness evolutions in overlapping welds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 264, pp. 220-233, (2019).
- [32] Han, B., Huang, Y., Lv, S., Wan, L., Feng, J., and Fu, G., "AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding", *Materials and Design*, Vol. 51, pp. 25-33, (2013).
- [33] Du, B., Cui, L., Yang, X., Wang, D., and Sun, Z., "Weakening mechanism and tensile fracture behavior of AA 2219-T87 friction plug welds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 693, pp. 129-135, (2017).
- [34] Du, B., Sun, Z., Yang, X., Cui, L., Song, J., and Zhang, Z., "Characteristics of friction plug welding to 10 mm thick AA2219-T87 sheet: Weld formation, microstructure and mechanical property", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 654, pp. 21-29, (2016).
- [35] Hattingh, D., James, M., Newby, M., Scheepers, R., and Doubell, P., "Damage assessment and refurbishment of steam turbine blade/rotor attachment holes", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 83, pp. 125-134, (2016).
- [17] Azimi-Roeeen, G., Kashani-Bozorg, S.F., Nosko, M., Nagy, Š., and Matko, I., Formation of Al/(Al13Fe4+ Al2O3) nano-composites via mechanical alloying and friction stir processing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 27(2), pp. 471-482, (2018).
- [18] Cui, L., Yang, X., Wang, D., Hou, X., Cao, J., and Xu, W., Friction taper plug welding for S355 steel in underwater wet conditions: Welding performance, microstructures and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 611, pp. 15-28, (2014).
- [19] Hattingh, D.G., Bulbring, D.L.H., Els-Botes, A., and James, M.N., Process parameter influence on performance of friction taper stud welds in AISI 4140 steel, *Materials and Design*, Vol. 32(6), pp. 3421-3430, (2011).
- [20] Teng, J., Wang, D., Wang, Z., Zhang, X., Li, Y., Cao, J., Xu, W., and Yang, F., Repair of arc welded DH36 joint by underwater friction stitch welding. *Materials and Design*, Vol. 118, pp. 266-278, (2017).
- [21] Li, W., Jiang, D., Yang, L., Pan, J., Qu, R., and Sun, T., Numerical simulation of temperature field and prediction of microstructure in friction hydro pillar processing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 252, pp. 370-380, (2018).
- [22] Kanan, L.F., Vicharapu, B., Bueno, A.F.B., Clarke, T., and De, A., Friction hydro-pillar processing of a high carbon steel: joint structure and properties, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 49(2), pp. 699-708, (2018).
- [23] Cui, L., Yang, X., Wang, D., Cao, J., and Xu, W., "Experimental study of friction taper plug welding for low alloy structure steel: welding process, defects, microstructures and mechanical properties", *Materials and Design*, Vol. 62, pp. 271-281, (2014).
- [24] Xiong, J., Yang, X., Lin, W., and Liu, K., "Microstructural characteristics and mechanical heterogeneity of underwater wet friction taper plug welded joints for low-alloy pipeline steel," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 695, pp. 279-290, (2017).
- [25] Chludzinski, M., Paes, M., Bastian, F., and Strohaecker, T., "Fracture toughness of friction hydro-pillar processing welding in C-Mn steel", *Materials and Design*, Vol. 33, pp. 340-344, (2012).
- [26] Metz, D., and Barkey, M., "Fatigue behavior of friction plug welds in 2195 Al-Li alloy",