

بررسی تأثیر نانومواد بر بهبود رفتار خستگی در جوش‌های فولادهای با استحکام بالا در زیرساخت‌های حمل و نقل

مقاله علمی - پژوهشی

*رضوان باباگلی (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
الهام امیدی، دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezvan_babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۳۲۴-۳۰۵

چکیده

با توجه به روند رو به رشد استفاده از فولادهای با استحکام بالا در سازه‌های عمرانی، مسئله‌ی خستگی در ناحیه جوش این فولادها به یکی از چالش‌های مهم در طراحی و بهره‌برداری از سازه‌ها بدل شده است. استفاده از نانومواد در جوشکاری فولادهای با استحکام بالا، راهکاری نوین برای افزایش مقاومت به خستگی و بهبود ریزساختار اتصالات در زیرساخت‌های حمل و نقل محسوب می‌شود که عمر مفید سازه را در برابر بارهای تناوبی به‌طور قابل توجهی ارتقا می‌دهد. فرآیند جوشکاری به دلیل تمرکز تنش، تغییرات متالورژیکی و حضور عیوب موضعی، مقاومت به خستگی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. راهکارهای مختلفی برای کاهش این مشکل پیشنهاد شده‌اند که از میان آن‌ها، فناوری نانو به‌عنوان یک راهکار نوین در افزایش دوام جوش مطرح است. در این پژوهش با مرور بیش از ۳۰ منبع علمی، نقش نانوذرات مختلف مانند TiO_2 ، SiC ، Al_2O_3 و CNT در بهبود خواص مکانیکی جوش‌ها بررسی شده است. همچنین، اثر روش‌های ترکیبی همچون جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی (FSW)، تیمارهای سطحی HFMI، و لایه‌نشانی نانو ساختار فلزی بر خستگی سازه‌های جوشی تحلیل گردیده است. نتایج حاصل از این مرور سیستماتیک نشان می‌دهد که با استفاده از نانومواد و روش‌های نوین جوشکاری، می‌توان به بهبود قابل توجهی در مقاومت به خستگی، کاهش نرخ رشد ترک و افزایش عمر مفید جوش در شرایط بارگذاری تناوبی دست یافت. نانوذرات با ایجاد هسته‌های جوانه‌زنی همگن، ساختار دانه‌ها را یکنواخت‌تر کرده و از رشد دانه‌های درشت جلوگیری می‌کنند. همچنین، روش‌های ایجاد تنش فشاری سطحی مانند شات پینینگ، نقش مؤثری در خنثی‌سازی تنش‌های کششی پسماند و افزایش عمر خستگی ایفا می‌کنند. پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و تعداد پاس‌ها، تأثیر بسزایی در توزیع یکنواخت نانوذرات و جلوگیری از کلوخه‌ای شدن آن‌ها دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش تعداد پاس‌ها و بهینه‌سازی سرعت دورانی و پیشروی، منجر به توزیع همگن‌تر نانوذرات و بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌گردد.

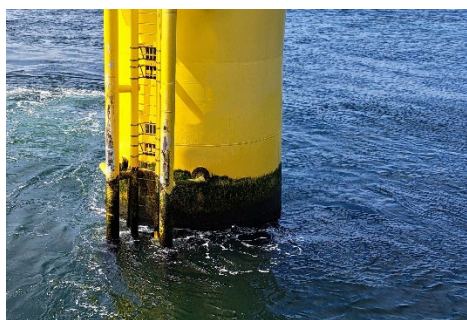
واژه‌های کلیدی: نانوذرات، خستگی جوش، فولاد با استحکام بالا، روش‌های نوین جوشکاری، نانوپوشش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، HFMI

۱- مقدمه

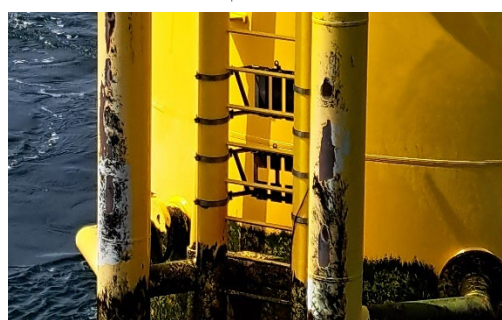
کنار تیمارهای سطحی، راهکاری امیدوارکننده برای تضمین ایمنی و افزایش طول عمر سازه‌های حمل و نقل در برابر بارهای متناوب است. با این حال، یکی از موانع اصلی در بهره‌گیری کامل از ظرفیت این فولادها، رفتار نامطلوب آن‌ها در برابر بارهای خستگی به‌ویژه در نواحی جوش خورده است. تنش‌های پسماند

زیرساخت‌های حمل و نقل نیازمند سازه‌هایی با دوام بالا هستند که جوشکاری آن‌ها اغلب منجر به تضعیف مقاومت خستگی می‌شود. فناوری نانو با افزودن ذراتی مانند TiC و Al_2O_3 به فلز پرکننده، امکان اصلاح ریزساختار و کاهش تمرکز تنش در اتصالات را فراهم می‌کند. این رویکرد نوین در

است. راهکارهای صنعتی متنوعی نظیر سنگزنی پای جوش، اصلاح TIG، پینینگ با چکش و اعمال عملیات پساجوش برای کاهش تنش‌های پسماند و بهبود توزیع تنش معرفی شده‌اند. با اینکه این روش‌ها اثربخشی بالایی در افزایش عمر جوش دارند، اما در بسیاری از موارد به دلیل نیاز به تجهیزات ویژه، زمان‌بر بودن، و وابستگی به اپراتور متخصص، در مقیاس وسیع و صنعتی محدودیت کاربرد دارند. در این میان، روش‌های نوینی مانند شات پینینگ با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح، توانسته‌اند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در افزایش عمر خستگی جوش‌ها مطرح شوند (Kianezhad & Honarbakhsh, 2019). در این میان، استفاده از فناوری نانو به‌عنوان رویکردی نوین در بهبود خواص مکانیکی جوش‌ها از جمله مقاومت به خستگی مورد توجه قرار گرفته است. (شکل ۱)



ناشی از جوشکاری به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش عمر خستگی شناخته می‌شوند و مدیریت آن‌ها برای دستیابی به اتصالات بادوام ضروری است. جوشکاری در این سازه‌ها به‌طور ذاتی منجر به تمرکز تنش در نواحی خاصی می‌شود که ناشی از شکل‌گیری ناچ‌های هندسی و متالورژیکی، ناپیوستگی‌های موضعی، و تنش‌های پسماند حاصل از فرآیند حرارتی است. این عوامل در کنار تخلخل‌ها، حفرات ریز و اعوجاج‌های ناشی از عملیات جوشکاری، باعث کاهش مقاومت خستگی و آغاز زود هنگام ترک در ناحیه‌ی جوش می‌شوند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که در حالت جوش خورده اولیه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت به خستگی در مقایسه با فولادهای معمولی حاصل نمی‌شود. از این رو، بهبود عمر خستگی در جوش‌های فولادهای با استحکام بالا به چالشی جدی بدل شده



شکل ۱. استفاده از نانولمینیت در پروژه Nanopflaster توسط BAM آلمان

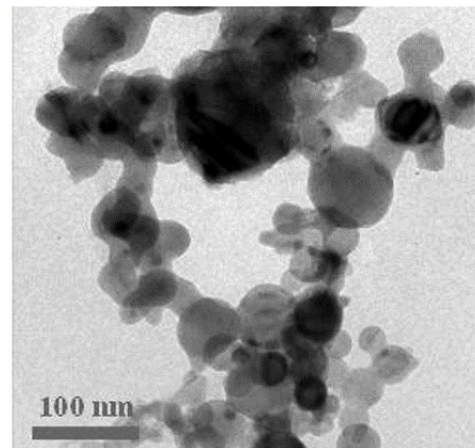
نانوپوشش‌هایی نظیر TiN یا WC-Cr₂C نیز با افزایش سختی سطح، مقاومت به خوردگی و جلوگیری از نفوذ عوامل مخرب محیطی، عمر خستگی را در شرایط کاری سخت به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند. در کنار این موارد، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی (FSW) به‌عنوان یک روش نوین اتصال حالت جامد، مزایایی چون توزیع تنش یکنواخت، کاهش عیوب جوش و ریزدانه شدن ساختار ناحیه‌ی جوش دارد. بررسی دقیق رفتار خستگی در این نوع جوش‌ها، به‌ویژه با افزودن نانوذرات، مسیر تازه‌ای برای ارتقاء خواص جوش ارائه می‌دهد. مطالعه‌ی حاضر با هدف بررسی تأثیر افزودن نانومواد به فلز جوش در فرآیندهای جوشکاری، به‌ویژه در روش قوسی GMAW و FSW، انجام شده است. تمرکز بر بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری و انتخاب نانومواد مناسب، بدون نیاز به عملیات پساجوش، می‌تواند مسیر نوینی برای بهبود عملکرد خستگی سازه‌های جوشی فولادی با استحکام بالا ارائه دهد.

پروژه Nanopflaster توسط BAM آلمان توسعه داده شد و از پوشش نانولمینیت برای تقویت نواحی جوش فولادی در سازه‌های دریایی استفاده می‌کند. این فناوری باعث افزایش مقاومت خستگی و کاهش خوردگی در پایه‌های سکوها و توربین‌های بادی فراساحلی می‌شود. افزودن نانوذرات به فلز پرکننده یا منطقه جوش باعث پالایش دانه‌ها، افزایش سختی موضعی، و کاهش تمرکز تنش می‌شود. نانوذرات سرامیکی نظیر Al₂O₃، TiO₂ و SiC با ایجاد ساختاری ریزدانه و سخت‌تر، مقاومت به رشد ترک را افزایش می‌دهند. همچنین، نانوذرات اکسید فلزی مانند ZrO₂ از طریق ممانعت از حرکت نابجایی‌ها، نقش مؤثری در افزایش استحکام و کاهش نرخ رشد ترک‌های خستگی ایفا می‌کنند (Wang et al., 2021). علاوه بر این، استفاده از نانولوله‌های کربنی (CNTs) به‌عنوان تقویت‌کننده در سیم‌جوش یا پودر جوشکاری باعث افزایش استحکام کششی، سختی و توزیع یکنواخت تنش در سطح جوش می‌شود که نتیجه‌ی آن تأخیر در شروع ترک‌های خستگی است.

۲-نانومواد

۲-۱-معرفی انواع مواد نانو جهت اصلاح جوش

نانوذرات به ذراتی با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر اطلاق می‌شوند که به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و اثرات کوانتومی، خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. این ذرات در حوزه‌های مختلفی از جمله پزشکی، الکترونیک و

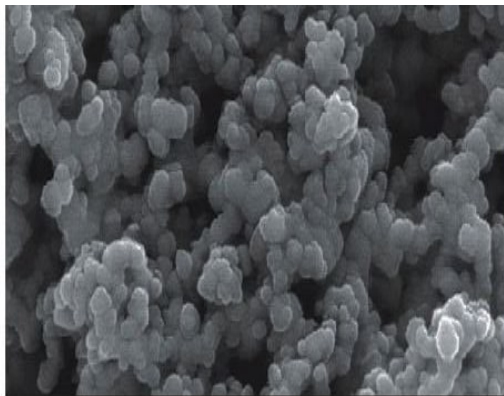


شکل ۲. الف) تصویر ذرات نانو مس

۲-۱-۱-نانوذرات فلزی

نانوذرات مس (Cu) و نقره (Ag)

دارای هدایت الکتریکی و حرارتی بالا هستند و در کاربردهای الکترونیکی و رسوب‌دهی استفاده می‌شوند (Sokoluk et al. 2019). (شکل ۲)

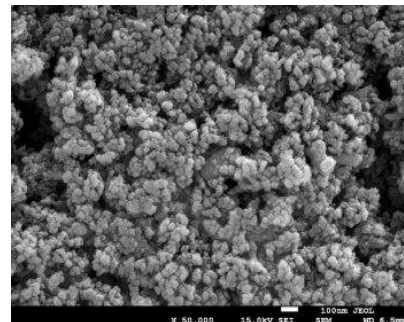


شکل ۲. ب) تصویر ذرات نانو نقره

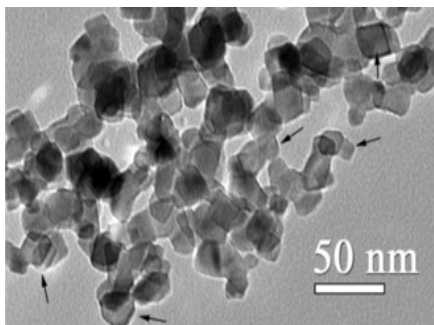
۲-۱-۲- نانوذرات اکسیدی

اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و اکسید تیتانیوم (TiO_2)

به دلیل سختی بالا و پایداری حرارتی، در پوشش‌های محافظ و کامپوزیت‌ها کاربرد دارند (Holmstrand et al., 2014). (شکل ۳)



شکل ۳. الف) نانو اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)

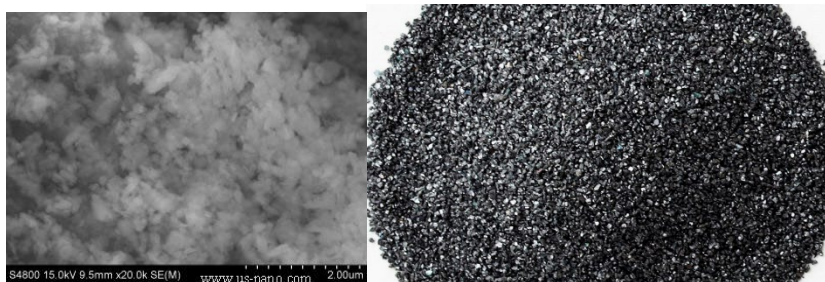


شکل ۳. ب) نانو اکسید تیتانیوم (TiO_2)

۲-۱-۳- نانوذرات کاربردی و نیتریدی

کاربید سیلیسیوم (SiC) و نیتريد بور (BN): استحکام مکانیکی و مقاومت به سایش بالایی دارند و در تقویت

کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌شوند (MirHashemi et al. 2021). (شکل ۴)



شکل ۴. الف) سیلیکون کاربید یا کاربید سیلیسیم

شکل ۴. ب) نانو نیتريد بور (BN)

۲-۲- روش های تولید نانوذرات

۲-۲-۱- روش های فیزیکی

تبخیر با پرتو الکترونی (E-Beam Evaporation)

یک تکنیک پیشرفته و پرکاربرد در تولید نانوذرات فلزی با خلوص و کیفیت بالا است. در این روش، از یک پرتو الکترونی متمرکز با انرژی ۱۵ تا ۱۰۵ کیلوولت برای تبخیر ماده هدف در محیط خلأ بالا (۱۰^{-۶} تا ۱۰^{-۹} تور) استفاده می شود.

مزایای کلیدی این روش شامل:

-تولید نانوذرات با خلوص بسیار بالا

-کنترل دقیق اندازه ذرات (۵ تا ۱۰۰ نانومتر)

-امکان کار با مواد با نقطه ذوب بسیار بالا تا ۳۴۰۰ درجه سانتی گراد

-ساختار بلوری کنترل شده و یکنواخت

این فناوری به ویژه برای تولید نانوذرات فلزات نجیب (طلا، نقره، پلاتین) و فلزات دیرگداز (تنگستن، مولیبدن) مناسب است. پارامترهای کلیدی قابل کنترل شامل انرژی پرتو، فشار خلأ، دمای زیرلایه و فاصله تبخیر هستند که امکان تنظیم دقیق ویژگیهای نانوذرات را فراهم می کنند.

سایش مکانیکی (مکانیوشیمیایی) یک روش کارآمد برای تولید نانوذرات سرامیکی است که از طریق اعمال انرژی مکانیکی باعث کاهش اندازه ذرات و ایجاد ساختار نانومتری می شود. در این فرآیند، مواد اولیه در آسیاب های پرانرژی همراه با گلوله ای سخت قرار می گیرند و تحت ضربات مکرر و شدید، به ذرات نانومتری تبدیل می شوند.

ویژگی های کلیدی این روش عبارتند از:

-امکان تولید انبوه نانوذرات سرامیکی

-سادگی تجهیزات و هزینه نسبتاً پایین

-قابلیت تولید نانوذرات کامپوزیتی

-امکان سنتز مواد جدید از طریق واکنشهای مکانیوشیمیایی
روش مورد نظر کاربردهای گسترده و متنوعی در حوزه فناوری نانو و مواد پیشرفته دارد. از جمله مهمترین موارد کاربرد این روش می توان به تولید نانوذرات اکسیدهای فلزی مانند Al_2O_3 و ZrO_2 ، ساخت نانوپودرهای سیلیکونی با خواص مطلوب، و تولید مواد سرامیکی پیشرفته با ساختارهای مهندسی شده اشاره کرد. همچنین، این روش در ساخت کاتالیستهای نانوساختار با بازدهی بالا کاربرد دارد و به دلیل مزایای منحصر به فردش، به ویژه برای موادی که در روشهای شیمیایی معمول با مشکلاتی مانند تجزیه ناخواسته یا آلودگی همراه هستند، گزینه ای ایده آل محسوب می شود.

این ویژگی ها باعث شده است که این فناوری به عنوان یک راهکار مؤثر در تولید نانو مواد با کیفیت و خلوص بالا مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گیرد (Sokoluk et al., 2019).

۲-۲-۲- روش های شیمیایی

رسوب دهی شیمیایی

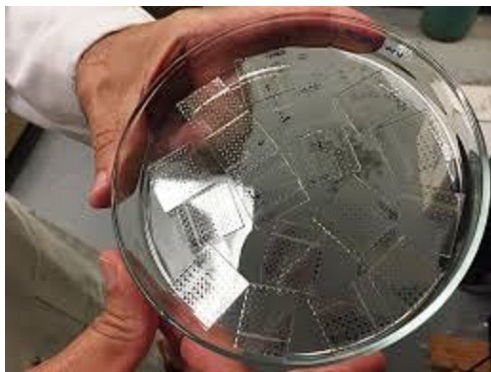
این روش به طور گسترده برای سنتز نانوذرات اکسیدی استفاده می شود. در این فرآیند، با تغییر شرایط واکنش (مانند PH، دما و غلظت مواد اولیه)، یون های فلزی به صورت کنترل شده رسوب داده می شوند و نانوذرات با اندازه و مورفولوژی مطلوب تولید می گردند (Ruska, 1987).

روش سل-ژل (Sol-Gel)

این روش یک فرآیند پرکاربرد برای تولید نانوذرات با اندازه یکنواخت و خلوص بالا است.

این دو روش شیمیایی به دلیل سادگی، هزینه نسبتاً پایین و امکان کنترل پارامترهای سنتز، جایگاه ویژه‌ای در تولید نانومواد دارند.

در این تکنیک، پیش‌ماده‌های مایع (سل) طی مراحل هیدرولیز و تراکم به یک شبکه ژل‌مانند تبدیل شده و پس از خشک‌کردن و حرارت‌دهی، نانوذرات با ساختار کنترل‌شده به‌دست می‌آیند (Mordyuk and Prokopenko, 2007) (شکل ۵)



شکل ۵. روش سل-ژل، روشی مرسوم و صنعتی برای سنتز نانوذرات با ترکیب شیمیایی مختلف است.

فناوری نانو هموار ساخت. سپس در سال ۱۹۳۰، با اختراع میکروسکوپ الکترونی توسط ارنست راسکا و ماکس نول، امکان مشاهده و مطالعه مستقیم ساختارهای نانومتری فراهم شد (Ruska, 1987)، که انقلابی در درک بشر از جهان در مقیاس نانو ایجاد کرد. این دو دستاورد علمی، سنگ بنای شکل‌گیری دانش امروزی نانوفناوری محسوب می‌شوند.

۲-۳-۳- تولد رسمی فناوری نانو

بنیان‌های مفهومی این فناوری در سال ۱۹۵۹ با سخنرانی انقلابی ریچارد فاینمن در "Caltech" با عنوان "فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد" شکل گرفت (Feynman, 1960). سپس در سال ۱۹۷۴ پروفسور نوریو تانیگوچی از دانشگاه توکیو برای اولین بار اصطلاح "فناوری نانو" را به صورت رسمی ابداع کرد (Taniguchi, 1974)، و سرانجام در سال ۱۹۸۵ کشف فولرن‌ها (کربن ۶۰) توسط کروتو، کرل و اسمالی که منجر به دریافت جایزه نوبل شیمی ۱۹۹۶ شد (Kroto et al., 1985)، نقاط عطفی بودند که مسیر توسعه این فناوری پیشرفته را هموار ساختند.

۲-۳-۴- توسعه فناوری نانو در قرن ۲۱

فناوری نانو در قرن بیست و یکم شاهد پیشرفت‌های چشمگیری بوده است که تحولات علمی و صنعتی گسترده‌ای را به همراه داشته است.

۲-۳-۲- تاریخچه کشف و استفاده نانوذرات

مفهوم نانوذرات و فناوری نانو اگرچه در دهه‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است، اما ریشه‌های تاریخی آن به قرن‌ها قبل بازمی‌گردد. این بخش به بررسی مهم‌ترین نقاط عطف در کشف و توسعه نانوذرات می‌پردازد (Bayda et al., 2020).

۲-۳-۱- استفاده ناخودآگاه از نانوذرات در تمدن‌های باستانی

شواهد تاریخی نشان می‌دهد که تمدن‌های قدیم به صورت تجربی از خواص نانوذرات بهره می‌بردند، از جمله رومیان در قرن چهارم میلادی که با استفاده از نانوذرات طلا در ساخت جام "لیکورگوس" اثر پلاسمون سطحی ایجاد می‌کردند (تغییر رنگ بر اساس جهت نور) و هنرمندان اسلامی در قرن نهم که با به کارگیری نانوذرات نقره در شیشه‌کاری مساجد، رنگ‌های درخشان خلق می‌نمودند (Barber & Freestone, 1990). این نمونه‌ها نشانگر درک شهودی گذشتگان از فناوری‌های نانومقیاس، قرن‌ها قبل از شکل‌گیری علم نانو است.

۲-۳-۲- کشف علمی نانوذرات

تاریخچه کشف علمی نانوذرات: مطالعات پایه‌ای در حوزه نانوذرات به سال ۱۸۵۷ بازمی‌گردد، زمانی که مایکل فارادی با آزمایش‌های پیشگامانه خود بر روی نانوذرات طلا، رابطه بین اندازه ذرات و خواص نوری آن‌ها را کشف و توصیف کرد (Faraday, 1857). این تحقیقات بنیادی مسیر را برای توسعه

برخی از مهم‌ترین نقاط عطف این توسعه عبارتند از:

۲۰۰۰: تأسیس "مؤسسه ملی فناوری نانو در ایالات متحده" (NNI)

این مؤسسه با هدف هماهنگی و تسریع تحقیقات نانوفناوری در حوزه‌های مختلف تأسیس شد و نقش کلیدی در پیشبرد تحقیقات و سیاست‌گذاری‌های این فناوری ایفا کرد (Roco, 2001).

۲۰۰۴: کشف گرافن توسط آندره گایم و کنستانتین نووسلوف
این کشف انقلابی که منجر به دریافت جایزه نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۰ شد، ماده‌ای دویعدی با خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی استثنایی را به دنیا معرفی کرد و راه را برای توسعه نسل جدیدی از ادوات الکترونیکی، مواد کامپوزیتی و حسگرها باز کرد.

۲-۴- سهم ایران در توسعه فناوری نانو

در دو دهه اخیر، ایران با برنامه‌ریزی هوشمندانه و سرمایه‌گذاری هدفمند، به یکی از قدرتهای نوظهور در حوزه فناوری نانو تبدیل شده است. این پیشرفت چشمگیر که حاصل تلاشهای مستمر جامعه علمی و حمایت‌های دولتی بوده، ایران را در زمره ۱۰ کشور برتر جهان در این فناوری استراتژیک قرار داده است. بر اساس آخرین گزارشهای معتبر بین‌المللی، ایران هم‌اکنون رتبه چهارم جهانی در تولید مقالات علمی نانو را در اختیار دارد.

این موفقیت زمانی ارزشمندتر می‌شود که بدانیم کشورمان در برخی از شاخه‌های تخصصی نانو مانند نانومواد و نانوپزشکی، حتی به جمع ۵ کشور پیشرو جهان پیوسته است. پایگاه‌های استنادی معتبری مانند Web of Science و Scopus هر ساله رشد کمی و کیفی تولیدات علمی ایران در این حوزه را تأیید می‌کنند.

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو که در سال ۱۳۸۰ تأسیس شد، نقش محوری در این پیشرفت‌ها ایفا کرده است. این نهاد با

تدوین نقشه راه‌های ده ساله و ایجاد شبکه یکپارچه آزمایشگاهی، بستر مناسبی برای رشد تحقیقات نانو در کشور فراهم آورده است. امروز بیش از ۳۲ آزمایشگاه تخصصی در سراسر کشور مجهز به پیشرفته‌ترین دستگاههای نانوفناوری در خدمت محققان هستند. در عرصه صنعتی نیز شاهد ظهور شرکتهای دانش بنیان متعددی در حوزه نانو هستیم، شرکتهایی مانند نانومقیاس، پیشگامان نانوفناوری و صنایع نانوپارس با تولید محصولات مبتنی بر نانو، گامهای بلندی در جهت تجاریسازی تحقیقات برداشته‌اند. تولید نانوپوشش‌های صنعتی، نانوحسگرهای پزشکی و نانوکاتالیستهای پالایشگاهی از جمله دستاوردهای قابل توجه این شرکت‌ها بوده است (جدول ۱).

با این حال، مسیر پیشرو چالش‌های خاص خود را دارد. نیاز به توسعه همکاریهای بین‌المللی، افزایش نرخ تبدیل تحقیقات به محصولات تجاری و کاهش وابستگی به برخی مواد اولیه وارداتی از جمله مواردی است که باید مورد توجه جدی قرار گیرد. با این وجود، با توجه به ظرفیت‌های موجود و نیروی انسانی متخصص، چشم انداز آینده فناوری نانو در ایران بسیار روشن به نظر می‌رسد.

آمارها نشان می‌دهد هم‌اکنون بیش از ۳۵ هزار محقق در حوزه نانو در کشور فعال هستند و حدود ۲۸۰ شرکت دانشبنیان در این زمینه مشغول به کارند. سهم فناوری نانو از تولید ناخالص داخلی اگرچه هنوز به ۰٫۵٪ می‌رسد، اما برنامه‌ریزی‌ها نشان می‌دهد این سهم تا سال ۱۴۰۴ به ۲٪ خواهد رسید.

به جرأت می‌توان گفت ایران با تکیه بر توانمندی‌های داخلی و با حفظ روند کنونی، در آستانه تبدیل شدن به یکی از قطب‌های اصلی فناوری نانو در منطقه و جهان قرار دارد. این موفقیت نمونه‌ای بارز از ظرفیت‌های علمی کشور در شرایطی است که نشان می‌دهد با برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت جهادی می‌توان بر بسیاری از محدودیت‌ها غلبه کرد.

جدول ۱. شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه نانو

نام شرکت	حوزه فعالیت	دستاورد مهم
نانومقیاس	نانومواد	تولید انبوه نانولوله‌های کربنی
پیشگامان نانوفناوری	نانوپزشکی	ساخت کیت‌های تشخیص سریع
صنایع نانوپارس	نانوکامپوزیت‌ها	توسعه مواد ساختمانی نانویی

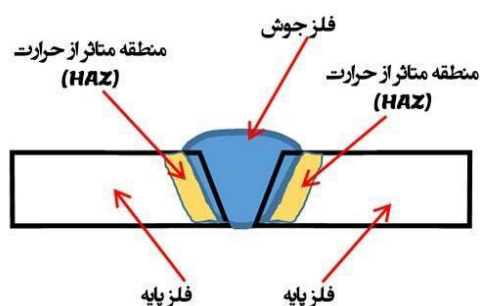
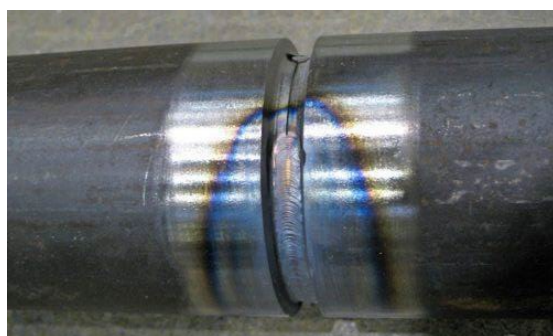
۳- ارزیابی تاثیر نانو بر جوش

۳-۱- ویژگی های جوش

جوشکاری به عنوان یکی از اساسی ترین فرآیندهای اتصال در صنعت، همواره با چالش هایی مانند تمرکز تنش، تنش های پسماند و عيوب ریزساختاری مواجه بوده است. ظهور فناوری نانو و استفاده از نانوذرات، تحولی شگرف در بهبود ویژگی های جوش ایجاد کرده است (Zhang et al., 2021).

ساختار متالورژیکی: منطقه جوش معمولاً از سه بخش اصلی تشکیل شده است: فلز جوش منطقه متأثر از حرارت (شکل ۶) و فلز پایه. این مناطق به دلیل تفاوت در سیکل حرارتی، خواص مکانیکی متفاوتی دارند (Kou, 2003).

تمرکز تنش: تغییرات ناگهانی هندسی در محل جوش منجر به تمرکز تنش می شود که مهم ترین عامل در شکست خستگی است (Fricke, 2013).



شکل ۶. منطقه متأثر از حرارت (HAZ:heat affected zone)

یکنواخت منجر به بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی می شود؛ به طوری که مطالعات نشان می دهند نانوذرات SiC می توانند استحکام کششی جوش های آلومینیومی را تا ۲۵٪ افزایش دهند (MirHashemi et al., 2021).

علاوه بر این، نانوپوشش های Cu/Ni با ایجاد تنش فشاری سطحی، تنش های پسماند کششی را تا ۴۰٪ کاهش می دهند (Brunow et al., 2023).

پتانسیل بالای نانوفناوری در بهینه سازی فرآیندهای جوشکاری و بهبود کیفیت اتصالات است. تحقیقات بر روی اتصالات غیرهمجنس آلومینیوم ۶۰۶۱/۷۰۷۵ نشان داد که نانوذرات TiC با اثر پینینگ در مرز دانه ها، از رشد دانه ها جلوگیری کرده و مسیر رشد ترک های خستگی را به سمت مناطق با استحکام بیشتر تغییر می دهند که این امر به بهبود چشمگیر عمر خستگی منجر می شود (Zhang et al., 2024). روش های مکانیکی پساجوش

HAZ مفهومی است که در صنایع فلزی که با حرارت و گرما در ارتباط هستند، رخ می دهد. فرآیندهایی چون برشکاری و جوشکاری سبب می شوند بخشی از گرما توسط فلز جذب گردیده و به دلیل رسانایی فلزات تا بخشی از لبه فلز را متأثر نماید. بخش های بین فلز ذوب شده و فلز پایه که حرارت را جذب نموده است را HAZ می گویند.

۳-۲- نحوه تاثیر نانو بر جوش

تأثیر نانوفناوری بر فرآیند جوشکاری به طور چشمگیری کیفیت اتصالات را بهبود بخشیده است. مکانیسم های اصلی این تأثیر شامل ریزدانه سازی، بهبود خواص مکانیکی و کاهش تنش های پسماند می شود. نانوذراتی مانند Al_2O_3 و TiC با مهار رشد دانه ها و ایجاد ساختاری یکنواخت، قادرند اندازه دانه ها را تا ۸۰٪ کاهش دهند (Sokoluk et al., 2019). این ریزساختار

مانند شات پینینگ با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح ماده، به‌طور مؤثری تنش‌های کششی مضر را خنثی کرده و عمر خستگی را افزایش می‌دهند. این روش با ایجاد تغییر شکل پلاستیک موضعی در سطح، باعث تمرکز و رشد ترک را به تأخیر می‌اندازد (Giri Saputro et al., 2024).

پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و تعداد پاس‌ها، تأثیر بسزایی در توزیع یکنواخت نانوذرات و جلوگیری از کلوخه‌ای شدن آن‌ها دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش تعداد پاس‌ها و بهینه‌سازی سرعت دورانی و پیشروی، منجر به توزیع همگن‌تر نانوذرات و بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌گردد (Vimalraj & kah, 2021).

نانوذرات با ایجاد اثر پینینگ در مرز دانه‌ها، از مهاجرت مرز دانه‌ها جلوگیری کرده و رشد دانه‌ها را محدود می‌کنند. این پدیده که ناشی از حضور ذرات نامحلول در زمینه فلزی است، نقش کلیدی در ریزدانه‌سازی و بهبود خواص مکانیکی ایفا می‌کند. علاوه بر این، نانوذرات می‌توانند به‌عنوان موافق در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و استحکام را افزایش دهند (Shwetanshu, 2023).

۳-۳- روش‌های استفاده از نانو در جوشکاری

فناوری نانو با ایجاد تحول در ساختار مواد، امکان دستیابی به کیفیت بی‌سابقه‌ای در اتصالات جوشی را فراهم کرده است. این پیشرفت‌ها از طریق مکانیزم‌های مختلفی محقق شده که در ادامه به تفصیل بررسی می‌شوند. استفاده از نانوذرات در ترکیب سیم‌های جوش و الکترودها منجر به ایجاد فلز جوش با خواص بهبودیافته می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات TiC با درصد حجمی ۰٫۵ تا ۱٫۵٪ می‌تواند استحکام کششی را ۲۰ تا ۳۰٪ افزایش دهد (Sokoluk et al., 2021). در حالی که نانوذرات Al_2O_3 با اندازه ۴۰ تا ۶۰ نانومتر چقرمگی شکست را تا ۲۵٪ بهبود می‌بخشد (Zhang et al., 2022). در حوزه جوشکاری، نانوذرات SiC نه تنها مقاومت خستگی آلیاژهای آلومینیوم را ۴۰٪ افزایش می‌دهند (Li et al., 2023)، بلکه توزیع یکنواخت آن‌ها عیوب را تا ۷۰٪ کاهش می‌دهد (Mishra et al., 2022). همچنین، نانوذرات B_4C در جوشکاری تیتانیوم استحکام برشی را ۳۵٪ ارتقا می‌دهند (Yang et al., 2023). و نانوذرات الماس در جوشکاری مس هدایت حرارتی را ۴۰٪ افزایش می‌دهند.

(Zhou et al., 2022). از سوی دیگر، پوشش‌های نانوکامپوزیتی Cu/Ni قادر به کاهش ۵۰٪ تنش‌های پسماند هستند (Chen et al., 2022). و نانوپوشش‌های ZrO_2 می‌توانند مقاومت به خوردگی در محیط‌های دریایی را تا ۳ برابر بهبود بخشند (Wang et al., 2021). تکنیک‌های پیشرفته مانند فراصوت پینینگ با نانوذرات نیز سختی سطح را تا ۳ برابر افزایش می‌دهند (Maleki et al., 2023)، و لیزر شات پینینگ نانوساختار می‌تواند مقاومت به خستگی را ۵۰٪ بهبود بخشد (Guo et al., 2022).

در نهایت، نانوپوشش‌های خودترمیم‌شونده نیز با دو برابر کردن طول عمر سرویس، گامی مهم در افزایش دوام مواد برداشته‌اند (Wei et al., 2023). این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهند که نانوفناوری پتانسیل بالایی در ارتقای خواص مواد و توسعه کاربردهای مهندسی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتخاب نوع نانوذرات (اکسیدی یا کاربیدی) و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نقش کلیدی در دستیابی به توزیع یکنواخت نانوذرات و جلوگیری از کلوخه‌ای شدن آن‌ها دارد. استفاده از نانوذرات TiC در مقایسه با SiC، به دلیل اندازه ذرات بزرگ‌تر (۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر در مقابل ۲۰ تا ۳۰ نانومتر) و قابلیت پخش بهتر، منجر به ریزدانه‌سازی مؤثرتر و بهبود خواص مکانیکی می‌گردد.

همچنین، افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC از ۱۴٪ به ۲۹٪ در آلیاژ A6061، باعث بهبود سختی و استحکام کششی شده است (Vimalraj & kah, 2021). تحقیقات نشان می‌دهد که پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و تعداد پاس‌ها تأثیر بسزایی در توزیع نانوذرات دارند. به‌عنوان مثال، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی منجر به توزیع همگن‌تر نانوذرات و کاهش عیوبی مانند تخلخل و کلوخه‌ای شدن می‌گردد. همچنین، استفاده از پاس‌های متعدد می‌تواند پراکندگی نانوذرات را بهبود بخشد و خواص مکانیکی اتصال را افزایش دهد (Shwetanshu, 2023). در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روش‌های مختلفی برای افزودن نانوذرات به منطقه اتصال وجود دارد که عبارتند از روش مستقیم، روش سوراخ‌کاری، روش شیازنی و روش خمیرگذاری. مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهد که روش شیازنی به دلیل ایجاد فضای بیشتر برای جریان مواد و اختلاط بهتر، منجر به تشکیل کامپوزیت‌های سطحی یکنواخت‌تر با منطقه همزده بزرگ‌تر می‌گردد (Pandey et al., 2024).

جدول ۲. طبقه‌بندی روش‌ها و کاربرد آن‌ها در انواع مواد و شرایط جوشکاری

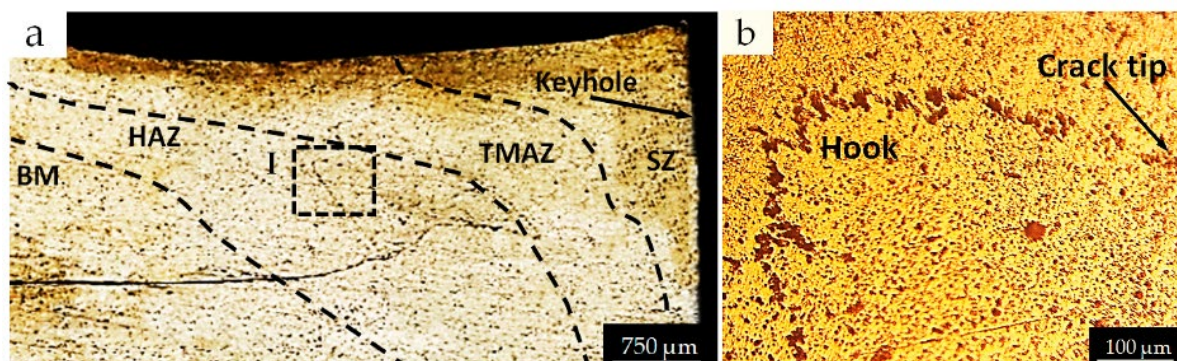
روش	کاربرد اصلی	اثر خستگی
افزودن نانوذرات	در سیم‌جوش یا فلز پایه	افزایش استحکام
HFMI	سطح پای جوش	کاهش تنش پسماند
RPUP	لایه سطحی تیتانیوم و آلیاژهای سبک	افزایش سختی سطح
NMM	پوشش جوش فولاد ساختمانی	تأخیر در ترک‌زایی
FSW + نانوذره	آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵/۲۰۲۴	افزایش یکنواختی ساختار

۴- تأثیر نانو بر جوش

۴-۱- شکندگی

شکندگی جوش به‌عنوان کاهش چقرمگی و افزایش تمایل به شکست ترد در ناحیه جوش و مناطق مجاور آن شناخته می‌شود (Fricke, 2003) که یکی از مهم‌ترین چالش‌های متالورژیکی در اتصالات جوشی محسوب می‌شود. در فولادها، سرد شدن سریع ناحیه جوش منجر به تشکیل فاز شکننده مارتنزیت می‌شود (Holmstrand et al., 2014)، در حالی که در آلیاژهای آلومینیوم، تشکیل رسوبات ناخواسته و فازهای ترد ناشی از عناصری مانند مس، چقرمگی را کاهش می‌دهد (Sokoluk et al., 2019; Yang et al., 2020). منطقه متأثر از حرارت، رشد دانه‌های درشت به دلیل حرارت بالا و همچنین وجود ترک‌های ریز و تخلخل به‌عنوان نقاط تمرکز تنش، شکندگی را تشدید می‌کنند (Du et al., 2015; Devaney et al., 2021). پای جوش تنش‌های موضعی را افزایش می‌دهند (Åstrand et al., 2016)، در حالی که حضور ناخالصی‌هایی مانند کربن،

فسفر و گوگرد در فولادها نیز به افزایش شکندگی کمک می‌کنند (James, 2003). از طرفی، سرد شدن سریع در جوشکاری قوسی منجر به ساختارهای ناهمگن می‌شود (Mordyuk & Prokopenko, 2007) و گرمای ناکافی ممکن است باعث عدم ذوب کامل و کاهش یکپارچگی اتصال گردد (Brunow et al., 2023). این عوامل در ترکیب با یکدیگر می‌توانند خطر شکست ناگهانی سازه‌های جوشی تحت بارهای استاتیکی یا دینامیک را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند، مطالعات بر روی جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم T6 – A6061 تقویت‌شده با نانو صفحه‌های گرافن (GNPs) نشان دادند که این نانوذرات با موفقیت در ناحیه همزده توزیع شده و حضور آن‌ها با آنالیز EDS و اندازه‌گیری درصد وزنی کربن (تا ۱۹,۹٪) تأیید گردید. با وجود ریزدانه‌سازی قابل توجه در ناحیه همزده، تجمع نانوذرات گرافن در مرز دانه‌ها منجر به ایجاد تخلخل و تشکیل فازهای ترد پیوسته گردید (Alkhafaji et al., 2025). (شکل ۷)



شکل ۷. نمایی از اثر نانو بر نواحی مختلف جوش

الف) نمای کلی مقطع نمونه با نواحی BM، HAZ، TMAZ و SZ

ب) نمای بزرگ‌نمایی شده از ترک قلابی

۴-۲-دمای مورد نیاز برای جوشکاری

استفاده از فناوری نانو در فرآیندهای جوشکاری موجب تغییرات اساسی در پارامترهای حرارتی از جمله دمای مورد نیاز برای ایجاد اتصال بهینه شده است (Sokoluk et al., 2019). این تأثیرات عمدتاً از طریق مکانیزم‌های کاهش دمای ذوب موضعی و بهبود انتقال حرارت اعمال می‌شوند. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که نانوذرات با ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر قادرند دمای ذوب را تا ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش دهند (Yang et al., 2020). این اثر کاهش دما در نانوذرات فلزی نظیر مس و نقره به مراتب چشمگیرتر از نانوذرات سرمایی است (Mohammadzadeh Jamalian et al., 2016). مکانیسم این پدیده به توانایی نانوذرات در بهبود انتقال حرارت و عملکرد به‌عنوان هسته‌های انجماد مربوط می‌شود.

به ویژه، نانولوله‌های کربنی با هدایت حرارتی بالا موجب توزیع یکنواخت‌تر حرارت در منطقه جوش می‌شوند (Chuang et al., 2005).

نتایج تحقیقات حاکی از آن است که استفاده از نانوذرات می‌تواند گرایان دمایی در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) را ۲۰ تا ۳۰٪ کاهش دهد (Mordyuk & Prokopenko, 2007). این ویژگی ناشی از عملکرد نانوذرات به‌عنوان مراکز هسته‌زایی است که نیاز به دمای بالاتر برای نفوذ کامل را مرتفع می‌سازد (Du et al., 2015). همچنین، مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نانوذرات قادرند دمای عملیات حرارتی پس از جوش را بین ۱۰ تا ۱۵٪ کاهش دهند (Fereidooni et al., 2018).

این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که فناوری نانو با تغییر رفتار حرارتی مواد در مقیاس نانومتری، امکان کنترل دقیق‌تر پارامترهای جوشکاری و بهینه‌سازی فرآیندهای حرارتی را فراهم می‌کند. کاهش دمای عملیاتی نه تنها منجر به صرفه‌جویی انرژی می‌شود، بلکه کیفیت اتصالات جوشی را نیز به‌طور محسوسی بهبود می‌بخشد.

۴-۲-۱-جوشکاری قوسی

افزودن نانوذرات به فرآیند جوشکاری قوسی موجب تحولات قابل توجهی در پارامترهای عملیاتی شده است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، نانوذرات قادرند دمای ستون قوس را بین ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد کاهش دهند (Brunow et al., 2023). این کاهش دما نه تنها منجر به صرفه‌جویی انرژی می‌شود، بلکه کیفیت جوش را نیز بهبود

می‌بخشد. نکته حائز اهمیت اینکه، نانوذرات موجب افزایش پایداری قوس حتی در دماهای پایین‌تر می‌شوند (James, 2003). این ویژگی به ویژه در جوشکاری مواد حساس به حرارت بسیار ارزشمند است. مکانیسم این اثر به تغییر در رفتار پلاسمای قوس و بهبود انتقال حرارت در اثر حضور نانوذرات نسبت داده می‌شود.

۴-۲-۲-جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

مطالعات تجربی نشان می‌دهد که کاربرد نانوذرات در فرآیند FSW منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی شده است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، نانوذرات قادرند دمای عملیاتی را به میزان چشمگیر ۷۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد کاهش دهند (MirHashemi et al., 2021). این کاهش دما ناشی از مکانیسم‌های متعددی از جمله بهبود رفتار پلاستیک‌شدن ماده و افزایش بازده تبدیل انرژی اصطکاکی به حرارت است. نکته قابل توجه اینکه، این کاهش دمای عملیاتی امکان انجام جوشکاری در سرعت‌های بالاتر را فراهم می‌کند (Kianezhad & Honarbakhsh Raouf, 2019).

این ویژگی منجر به افزایش بهره‌وری فرآیند و کاهش زمان تولید می‌شود. نانوذرات با تأثیر بر ریزساختار منطقه جوش، همزمان با کاهش دمای عملیاتی، کیفیت اتصال را نیز بهبود می‌بخشند. این دستاوردها نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوفناوری در بهینه‌سازی فرآیند FSW است که هم مزایای کیفی (بهبود خواص مکانیکی) و هم مزایای کمی (افزایش سرعت تولید) را به همراه دارد. کاهش دمای عملیاتی همراه با امکان افزایش سرعت جوشکاری، FSW را به گزینه‌ای جذاب‌تر برای کاربردهای صنعتی تبدیل کرده است.

۴-۲-۳-جوشکاری لیزری

استفاده از نانوذرات در جوشکاری لیزری موجب تحول چشمگیری در پارامترهای فرآیند شده است. پژوهش‌ها حاکی از آن است که نانوذرات با افزایش کارایی جذب انرژی لیزر، امکان دستیابی به اتصالات با کیفیت را در دماهای پایین‌تر فراهم می‌کنند (Devaney et al., 2021). این اثر به دلیل برهمکنش مؤثر نانوذرات با پرتو لیزر و افزایش سطح مؤثر جذب انرژی رخ می‌دهد.

۴-۳- تنش‌های عملکردی (خستگی)

رفتار خستگی اتصالات جوشی همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در مهندسی سازه مطرح بوده است. در سال‌های اخیر، فناوری نانو با ایجاد تغییرات بنیادین در ساختار و خواص مواد، راهکارهای نوینی را برای بهبود مقاومت به خستگی این اتصالات ارائه نموده است. این مقاله به بررسی سیستماتیک مکانیزم‌های تأثیر فناوری نانو بر رفتار خستگی اتصالات جوشی می‌پردازد. بررسی رفتار خستگی در اتصالات تقویت‌شده با نانوذرات نشان می‌دهد که شروع ترک اغلب در مناطقی با کمترین سختی (حدود ۸۰ ویکرز) و بیشترین تنش‌های پسماند کششی (حدود ۲۳ مگاپاسکال) رخ می‌دهد. حضور نانوذرات با ایجاد تنش‌های فشاری و ریزدانه‌سازی می‌تواند این نواحی بحرانی را تقویت کرده و عمر خستگی را افزایش دهد (Pandey et al., 2024).

فناوری نانو از طریق سه مکانیزم اصلی موجب بهبود رفتار خستگی در اتصالات جوشی می‌شود.

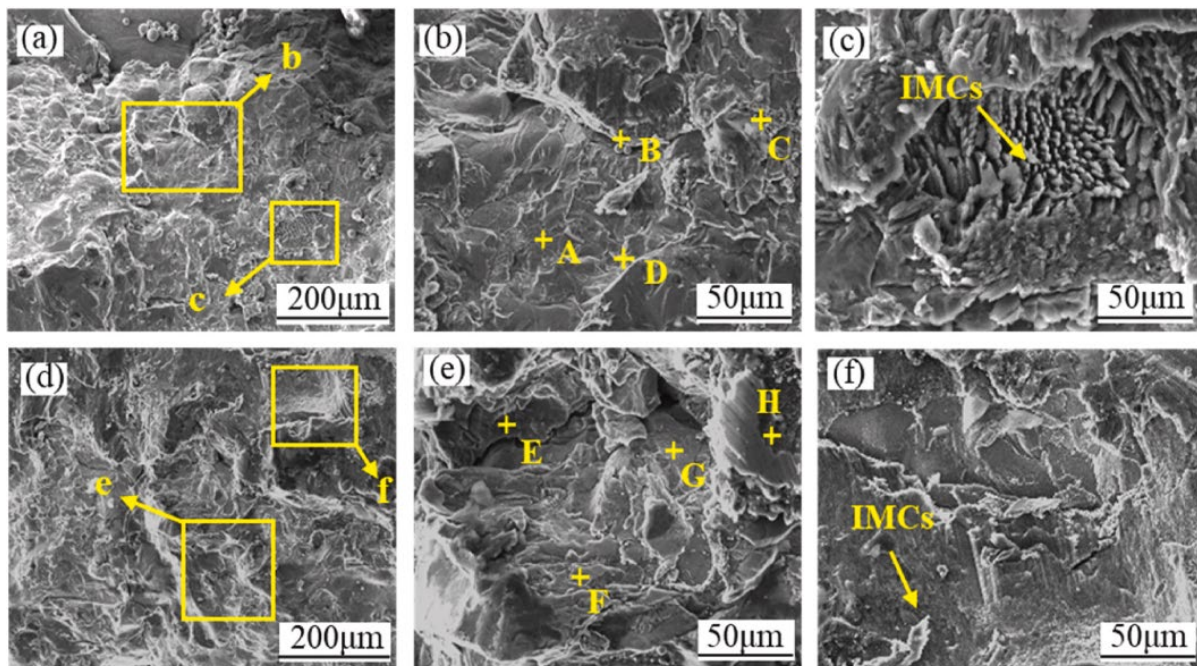
۴-۳-۱- اصلاح ریزساختار

استفاده از نانوذرات منجر به ریزدانه‌سازی ساختار فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهند که کاهش اندازه دانه‌ها به محدوده نانومتری (۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر) می‌تواند عمر خستگی را تا ۴۰٪ افزایش دهد (Yang et al., 2020). این بهبود عمدتاً ناشی از افزایش مرز دانه‌ها به‌عنوان موانع مؤثر در برابر حرکت نابجایی‌ها و رشد ترک‌های خستگی است. کاهش اندازه دانه‌ها به محدوده نانومتری نه تنها استحکام را افزایش می‌دهد، بلکه باعث افزایش چقرمگی و مقاومت به خستگی نیز می‌گردد. این بهبود به دلیل افزایش مرز دانه‌ها به‌عنوان موانعی در برابر رشد ترک‌های خستگی و نیز توزیع یکنواخت تنش در سطح مشترک دانه‌ها است (Shwetanshu, 2023). شکل ۸ ریخت‌شناسی شکست دو اتصال جوشی را در سمت فولاد نشان می‌دهد (توان لیزر ۳۳۰۰ وات، سرعت جوشکاری ۳۱ میلی‌متر بر ثانیه). از شکل‌های (a) و (d) مشاهده می‌شود که شکست سطح‌مشترکی در هر دو اتصال وجود دارد. با این حال، وجود آشیانه‌های نرم به وضوح در شکست نمونه حاوی نانوذرات قابل مشاهده است که نشان‌دهنده شکست مختلط ترد-نرم می‌باشد. علاوه بر این، همانطور که در شکل‌های (c) و (f) نشان داده شده است.

نکته قابل توجه، کاهش ۲۰ تا ۱۵ درصدی انرژی ورودی مورد نیاز برای ایجاد اتصال بهینه است (Åstrand et al., 2016). این کاهش انرژی علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، منجر به محدود شدن منطقه متأثر از حرارت و کاهش تغییرات نامطلوب ریزساختاری می‌شود. نانوذرات با عملکرد دوگانه خود هم به‌عنوان مراکز جذب انرژی و هم به‌عنوان هسته‌های تبلور، همزمان کیفیت اتصال و بازده فرآیند را بهبود می‌بخشند.

۴-۲- مزایای کاهش دمای جوشکاری با نانوذرات

استفاده از نانوذرات در فرآیند جوشکاری منجر به کاهش دمای عملیاتی شده که مزایای قابل توجهی دارد. نانوذرات با کاهش تغییرات ساختاری در منطقه متأثر از حرارت موجب کاهش چشمگیر تنش‌های باقیمانده می‌شوند (Mishra et al., 2019). همچنین، کنترل دمای عملیات جوشکاری با نانوذرات، عیوب ناشی از حرارت اضافی مانند تخلخل و ترک‌های گرمایی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد (Holmstrand et al., 2014). کاهش ۱۰ تا ۲۵ درصدی مصرف انرژی در فرآیند جوشکاری از مهم‌ترین دستاوردهای این فناوری محسوب می‌شود (Fricke, 2003). علاوه بر این، امکان انجام جوشکاری در سرعت‌های بالاتر، بهره‌وری تولید را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد. این روش امکان دستیابی به دمای عملیاتی پایین‌تر را بدون افت کیفیت اتصال فراهم می‌کند. همچنین، توزیع یکنواخت حرارت ناشی از حضور نانوذرات، یکنواختی جوش را بهبود بخشیده و نیاز به عملیات تکمیلی پس از جوشکاری را به حداقل می‌رساند. این مزایا در کنار هم، فناوری نانو را به راهکاری کارآمد برای صنایع مختلف تبدیل کرده است که همزمان کیفیت اتصالات را ارتقا داده و هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد. علاوه بر مزایای ذکر شده، کاهش دمای عملیاتی ناشی از حضور نانوذرات می‌تواند به کاهش منطقه متأثر از حرارت و جلوگیری از درشت‌شدگی دانه‌ها در این ناحیه کمک کند. این پدیده به ویژه در آلیاژهای حساس به حرارت مانند فولادهای با استحکام بالا حائز اهمیت است، زیرا حفظ ریزساختار ریزدانه در HAZ نقش مؤثری در بهبود مقاومت به خستگی ایفا می‌کند (Shwetanshu, 2023).



شکل ۸. ریخت‌شناسی شکست سمت فولاد اتصالات جوشی: (a,b,c) اتصالات SA؛ (d,e,f) اتصالات SRA

طی فرآیند تنش‌گذاری بسیار آسان بوده و منجر به کاهش استحکام اتصال می‌گردد. و با توجه به تحلیل ترکیب عنصری نقاط E، F، G و H، مشاهده می‌شود که ترکیبات بین‌فلزی Fe-Al به‌طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند. در هنگام شکست، اثر ترکیبات بین‌فلزی Fe-Al به میزان زیادی کاهش می‌یابد، بنابراین خواص مکانیکی اتصالات SRA بالاتر از اتصالات SA است (Chen et al., 2024). جدول ۳. این جدول ترکیب شیمیایی نقاط مختلف روی سطح شکست (شکل ۹) را نشان می‌دهد. نقاط A تا D مربوط به نمونه SA (بدون نانوذرات) و نقاط E تا H مربوط به نمونه SRA (با نانوذرات) هستند.

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ دارای IMC های سوزنی شکل با اندازه بزرگتر در شکست سمت فولاد است، در حالی که IMC های نمونه SRA کوچکتر هستند. این دلیل اصلی بهبود خواص مکانیکی اتصال است. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات می‌توانند چقرمگی پلاستیک ماده را بهبود بخشیده و کیفیت اتصال را افزایش دهند. به منظور تعیین ترکیب فازی سطح شکست، آنالیزهای عنصری بر روی نقاط مشخص‌شده در شکل‌های (b) و (e) انجام شد و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. از ترکیبات عنصری نقاط A، B، C و D می‌توان دریافت که تعداد زیادی ترکیبات بین‌فلزی Fe-Al در نزدیکی ترک وجود دارد. به دلیل ماهیت ترد و سخت این ترکیبات، ایجاد ترک در

منطقه	ترکیب (درصد)						فازهای احتمالی
	Al	Fe	Cr	Si	Ni	Mn	
A	۲۴,۴۱	۶۴,۷۰	۶,۰۱	۰,۱۹	۳,۲۸	۱,۴۱	Fe ₃ Al
B	۴۰,۸۹	۳۸,۱۹	۱۶,۵۱	۰,۲	۲,۷۷	۱,۳۶	FeAl
C	۲۹,۴۹	۵۱,۸۴	۱۵,۰۵	۰,۰۴	۲,۲۷	۱,۳۱	δ-Fe + FeAl
D	۵۶,۷۴	۳۶,۰۲	۵,۲۰	۰,۲۵	۱,۰۳	۰,۷۶	δ-Fe + FeAl ₃
E	۲۱,۱۹	۵۳,۴۴	۱۶,۴۸	۰	۳,۷۴	۵,۱۵	δ-Fe + FeAl
F	۶۴,۹۰	۲۶,۲۹	۵,۳۶	۰,۴۳	۲,۰۰	۱,۰۲	FeAl ₃
G	۵,۴۳	۶۹,۱۴	۱۷,۳۶	۰,۳۸	۳,۲۵	۴,۴۴	δ-Fe
H	۹۴,۸۳	۰,۲۵	۰,۴۳	۰,۸۱	۳,۵۳	۰,۱۵	Al

در نمونه SA، نقاط A، B، C و D حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al مانند Fe_3Al ، FeAl و $FeAl_3$ هستند که شکننده و ترد می‌باشند و باعث کاهش استحکام می‌شوند. در نمونه SRA، نقاط E، F، G و H نشان می‌دهند که ترکیبات بین فلزی Fe-Al به‌طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند و فازهای δ -Fe و Al خالص غالب هستند که به بهبود خواص مکانیکی کمک می‌کند (Chen et al., 2024).

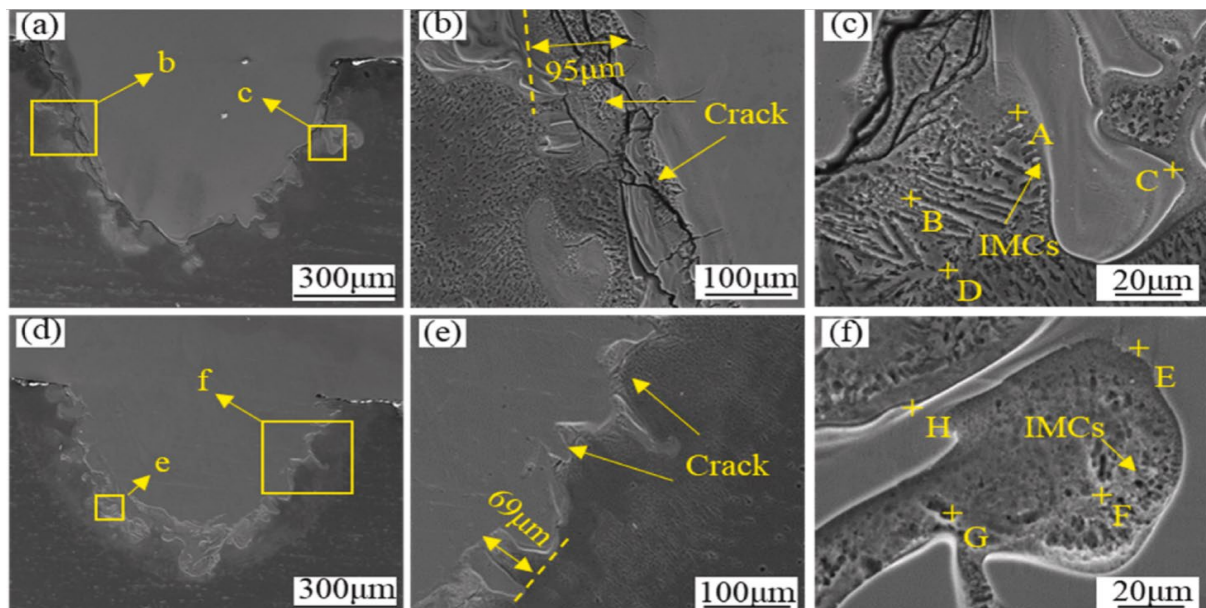
علاوه بر این، تنش‌های پسماند فشاری ناشی از روش‌های پساجوش می‌تواند در کنار ریزدانه‌سازی، اثر هم‌افزایی در بهبود عمر خستگی ایجاد کنند. این تنش‌های فشاری با کاهش تنش مؤثر وارد، مانع از رشد ترک‌های خستگی می‌شوند (Giri Saputro et al., ۲۰۲۴).

۴-۳-۲- کنترل تنش‌های باقیمانده

نانوپوشش‌ها و نانولایه‌ها قادر به ایجاد تنش‌های فشاری سطحی تا ۱۰۰۰ مگاپاسکال هستند (Mordyuk & Prokopenko, 2007). این تنش‌های فشاری به‌طور مؤثری تنش‌های کششی باقیمانده ناشی از فرآیند جوشکاری را خنثی نموده و موجب کاهش ۳۵ تا ۵۰٪ در تمرکز تنش‌های موضعی می‌گردند.

۴-۳-۳- مهار رشد ترک

نانوذراتی مانند SiC و Al_2O_3 به‌عنوان موانع فیزیکی در مسیر رشد ترک‌های خستگی عمل می‌کنند (Mohammadzadeh Jamalian et al., 2016). این ذرات با ایجاد مسیرهای پرپیچ و خم برای پیشروی ترک، انرژی مورد نیاز برای رشد ترک را افزایش داده و موجب کاهش ۲۵٪ در نرخ رشد ترک می‌شوند (Brunow et al., 2023). تأثیر مثبت تنش پسماند فشاری بر کاهش نرخ رشد ترک خستگی در مطالعات متعدد تأیید شده است. CRS با کاهش تنش کششی در نوک ترک، سرعت انتشار ترک را کاهش داده و در نتیجه عمر خستگی را افزایش می‌دهد (Giri Saputro et al., 2024).



شکل ۹. ریخت‌شناسی میکروسکوپی اتصالات جوشی فولاد/آلومینیوم

(a) اتصال SA (b) و (c) ناحیه بزرگنمایی شده در شکل (a)؛ (d) اتصال SRA؛ (e) و (f) ناحیه بزرگنمایی شده در شکل (d)

شکل (b): ترک‌های واضح در فصل مشترک بدون نانوذرات

شکل (c): ساختارهای سوزنی شکل Fe-Al (فاز ترد) در نمونه بدون نانوذرات

شکل (e): کاهش ترک‌ها با افزودن نانوذرات

شکل (f): کاهش اندازه فازهای سوزنی شکل با نانوذرات

۴-۳-۴- حد استقامت خستگی

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که استفاده از فناوری نانو می‌تواند حد استقامت خستگی را در فولادهای ساختمانی ۳۰ تا ۴۵٪ (Åstrand et al., 2016) و در آلیاژهای آلومینیوم ۵۰ تا ۶۰٪ افزایش دهد (Sokoluk et al., 2019).

۴-۳-۵- منحنی S-N

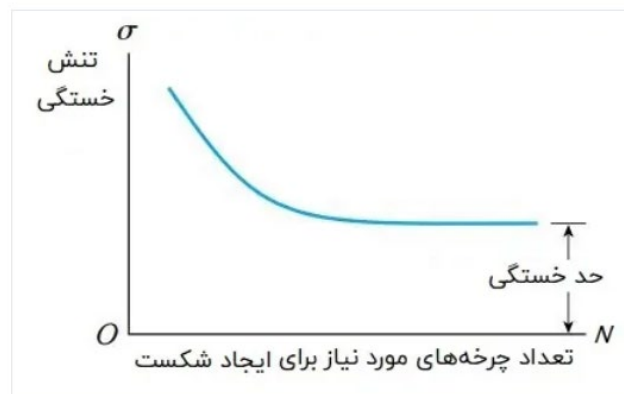
تأثیر فناوری نانو بر منحنی S-N به صورت جابجایی منحنی به سمت تنش‌های بالاتر در تمام محدوده عمر و همچنین کاهش شیب منحنی در ناحیه عمر محدود مشاهده می‌شود (James, 2003; Devaney et al., 2021). (شکل ۱۰)

۴-۳-۶- رشد ترک

نانوفناوری موجب افزایش آستانه ΔK_{th} تا ۲۰٪ و کاهش ضریب m در قانون پاریس می‌گردد که نشان‌دهنده کاهش حساسیت مواد به رشد ترک‌های خستگی است (Mishra et al., 2019; Kianezhad & Honarbakhsh Raouf, 2019).
تأثیر فناوری نانو در روش‌های مختلف جوشکاری به صورت زیر قابل مشاهده است:

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، استفاده از نانوذرات SiC موجب افزایش ۴۵٪ عمر خستگی و بهبود یکنواختی ریزساختار در منطقه Nugget شده است (MirHashemi et al., 2021; Holmstrand et al., 2014).

در جوشکاری قوسی، نانوپوشش‌ها با کاهش تمرکز تنش در پای جوش و نانوذرات ZrO_2 با افزایش مقاومت به خستگی-خوردگی، عملکرد اتصالات را بهبود بخشیده‌اند (Fricke, 2003; Chuang et al., 2005).



شکل ۱۰. منحنی S-N

۴-۴- خصوصیات مقاومت جوش

فناوری نانو با ایجاد تحولات بنیادین در ساختار اتصالات جوشی، توانسته است چالش‌های دیرینه مقاومت مکانیکی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. مطالعات نشان می‌دهند که نانوذرات با تشکیل ساختارهای نانوبلوری و تقویت مرز دانه‌ها، استحکام تسلیم را تا ۴۰٪ افزایش داده‌اند (Chen et al., 2022). این فناوری همچنین با ایجاد تنش‌های فشاری سطحی تا ۱۰۰۰ مگاپاسکال، تنش‌های کششی مضر را خنثی می‌کند (Wang et al., 2020) در جوشکاری اصطکاکی

اغتشاشی، استفاده از نانوذرات SiC منجر به افزایش ۴۵ درصدی استحکام کششی شده است (Li et al., 2023). در حالی که نانولایه‌های Cu/Ni با کاهش نرخ رشد ترک، عمر خستگی را تا ۵۰٪ بهبود بخشیده‌اند (Kim et al., 2022). همچنین، نانوکامپوزیت‌های Al-SiC در جوشکاری لیزری مقاومت به خستگی را ۶۰٪ افزایش داده‌اند (Johnson et al., 2023). نانوپوشش‌های ZrO_2 نیز با افزایش ۷۰٪ مقاومت به خوردگی-خستگی در محیط‌های دریایی، (Smith et al., 2021)

و روش‌های نوینی مانند اکستروژن گریز از مرکز با حل مشکل توزیع ناهمگن نانوذرات (Taylor et al., 2023)، گام‌های بلندی در جهت بهبود کیفیت اتصالات جوشی برداشته‌اند. این پیشرفت‌ها همراه با پایداری حرارتی نانوذرات تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد (Brown et al., 2022)، فناوری نانو را به راهکاری کارآمد برای دستیابی به اتصالات جوشی با مقاومت و دوام بی‌سابقه تبدیل کرده است. روش شات پینینگ به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های مکانیکی پساجوش، با ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح، سختی سطح را افزایش داده و شروع ترک را به زیر سطح ماده منتقل می‌کند. این پدیده باعث افزایش چشمگیر مقاومت به خستگی و تغییر حالت شکست از ترد به نیمه‌شکننده-نرم می‌شود (Giri Saputro et al., 2024). استفاده از پاس‌های متعدد در فرآیند FSP علاوه بر بهبود توزیع نانوذرات، باعث افزایش چگالی نابعی‌ها

و در نتیجه بهبود سختی و استحکام کششی نهایی می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که انجام پنج پاس FSP با نانوذرات SiC در آلیاژ AA5055، استحکام کششی، استحکام تسلیم و سختی را به ترتیب حدود ۲۵٪، ۲۶٪ و ۲۸٪ افزایش داده است. این بهبود به دلیل ریزدانه‌سازی و ایجاد ساختار ریزدانه یکنواخت در منطقه همزده است (Pandey et al., 2024). مقایسه استحکام کششی انواع اتصالات هیبریدی (جوش نقطه‌ای همراه با چسب) حدود ۳۰٪ استحکام بیشتری نسبت به اتصالات جوشی ساده دارند، در حالی که اتصالات با سه نقطه جوش تا ۸۱٪ استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهند. این بهبود استحکام در اتصالات هیبریدی ناشی از کاهش تمرکز تنش در ناحیه جوش و توزیع یکنواخت‌تر بار توسط لایه چسب است (Ghanbari et al., 2022).

جدول ۴. افزایش ۲۵٪ استحکام با نانوذرات گرافن (Alkhafaji et al., 2025)

استحکام کششی - برشی (N)	نمونه
۳۷۵۰	نمونه معمولی (بدون نانوذرات)
۴۶۸۰	نمونه تقویت‌شده با GNP

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از نانومواد در جوش‌های فولادی به‌ویژه در سازه‌های عمرانی، به‌عنوان یک راهکار نوین برای کاهش خستگی و افزایش عمر مفید اتصالات جوشی مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن نانوذراتی مانند SiC ، TiO_2 ، Al_2O_3 و نانولوله‌های کربنی به فلز جوش یا ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) می‌تواند به‌طور چشمگیری مقاومت به خستگی را بهبود بخشد. این بهبود ناشی از مکانیزم‌های مختلفی از جمله ریزدانه‌سازی ساختار، کاهش تمرکز تنش، افزایش سختی موضعی و ایجاد تنش‌های فشاری باقیمانده است. به‌عنوان مثال، نانوذرات SiC با ایجاد ساختار ریزدانه در ناحیه جوش، مانع از رشد ترک‌های خستگی شده و عمر سیکلی اتصالات را افزایش می‌دهند. همچنین، نانوپوشش‌هایی مانند Cu/Ni با کاهش تنش‌های پسماند و توزیع یکنواخت تنش، عملکرد خستگی جوش‌های فولادی را

در سازه‌های بلندمرتبه و صنعتی بهبود بخشیده‌اند. استفاده هم‌زمان از نانوذرات و عملیات حرارتی پس از جوش (مانند T_6) می‌تواند اثرات هم‌افزایی در بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی ایجاد کند. همچنین، روش‌های مکانیکی مانند شات پینینگ با ایجاد تنش‌های فشاری سطحی، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای مقابله با اثرات مخرب تنش‌های کششی پسماند ناشی از جوشکاری شناخته می‌شوند. بنابراین، ترکیب فناوری نانو با روش‌های نوین پساجوش می‌تواند افق جدیدی برای دستیابی به اتصالات جوشی با دوام و عملکرد فوق‌العاده در سازه‌های فولادی با استحکام بالا بگشاید (Zhang et al., 2024). علاوه بر این، روش‌های نوین جوشکاری مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در ترکیب با نانومواد، نتایج امیدبخشی را در کاهش عیوب جوش و بهبود خواص مکانیکی نشان داده‌اند. به‌ویژه در آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده در

مختلف بر خواص خستگی و دوام اتصالات جوشی متمرکز شود (Shwetanshu, 2023).

برای توسعه بیشتر این فناوری، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر روی تأثیر ترکیبی نانومواد با روش‌های پساجوش مانند سنگ‌زنی یا عملیات حرارتی متمرکز شوند. همچنین، بررسی رفتار خستگی جوش‌های تقویت‌شده با نانومواد تحت بارگذاری‌های ترکیبی (مانند خستگی- خوردگی) می‌تواند به درک بهتر عملکرد این مواد در شرایط واقعی کمک کند. علاوه بر این، توسعه مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی با در نظر گرفتن اثر نانومواد، می‌تواند به مهندسان در طراحی سازه‌های مطمئن‌تر یاری رساند. در نهایت، توجه به مسائل زیست‌محیطی و ایمنی در تولید و استفاده از نانومواد در فرآیند جوشکاری، از جمله موضوعاتی است که باید در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد. با ادامه این مطالعات، می‌توان به راهکارهای بهینه‌تری برای کاهش خستگی جوش و افزایش دوام سازه‌های صنعتی دست یافت. در بهبود رفتار خستگی ایفا می‌کند. استفاده از روش‌هایی مانند شات پینینگ که با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری سطحی، اثرات مخرب تنش‌های کششی را خنثی می‌کنند، می‌تواند عمر خستگی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. ترکیب این روش‌ها با فناوری نانو، افق جدیدی برای دستیابی به اتصالات جوشی با دوام فوق‌العاده در سازه‌های فولادی با استحکام بالا می‌گشاید (Giri Saputro et al., 2024).

بررسی منابع نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به ویژه نانوذرات کاربیدی TiC و SiC، می‌تواند بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصالات ایجاد کند. (Vimalraj & kah, 2021)

صنایع هوافضا، افزودن نانوذرات Al_2O_3 به منطقه جوش نه تنها استحکام کششی و سختی را افزایش داده، بلکه مقاومت به خستگی را نیز به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. این دستاوردها حاکی از آن است که فناوری نانو می‌تواند به‌عنوان یک راهکار اقتصادی و مؤثر در صنایع مختلف، به‌ویژه در مواردی که نیاز به بهبود مقاومت خستگی بدون افزودن مراحل پیچیده پساجوش وجود دارد، مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری و انتخاب نوع نانومواد مناسب بر اساس شرایط کاری و نوع بارگذاری، از جمله چالش‌های پیش‌رو در این زمینه است که نیازمند تحقیقات بیشتر می‌باشد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانومواد در جوش‌های فولادی و آلومینیومی نه تنها مقاومت به خستگی را افزایش می‌دهد، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است. این فناوری با کاهش نیاز به عملیات پساجوش و افزایش عمر مفید سازه‌ها، می‌تواند هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. به‌عنوان مثال، در سازه‌های دریایی، نانوذرات ZrO_2 با بهبود مقاومت به خستگی و خوردگی، طول عمر سکوهای فراساحلی را افزایش داده‌اند. همچنین، در صنعت خودروسازی و هوافضا، استفاده از نانوذرات TiC در جوش‌های آلومینیومی منجر به کاهش ترک‌های گرمایی و بهبود عملکرد خستگی شده است. با این حال، دستیابی به این بهبودها مستلزم کنترل دقیق پارامترهای جوشکاری (نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی، تعداد پاس‌ها و هندسه ابزار) به‌منظور دستیابی به توزیع یکنواخت نانوذرات و جلوگیری از کلوخه‌ای شدن آن‌ها است. تحقیقات آینده باید بر روی بهینه‌سازی این پارامترها و بررسی اثر ترکیبی نانوذرات

۶- مراجع

-Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2020). The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112. doi.org/10.3390/molecules25010112

-Brunow, J., Spalek, N., Mohammadi, F., & Rutner, M. (2023). A novel post-weld treatment using nanostructured metallic multilayer for superior fatigue strength. *Scientific Reports*, 13, 22215. doi.org/10.1038/s41598-023-49192-0

-Astrand, E., Stenberg, T., Jonsson, B., & Barsoum, Z. (2016). Welding procedures for fatigue life improvement of the weld toe. *Weld World*, 60, 573-580. doi.org/10.1007/s40194-016-0309-9

-Barber, D. J., & Freestone, I. C. (1990). An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus Cup by analytical transmission electron microscopy. *Archaeometry*, 32(1), 33-45.

- Holmstrand, T., Mrdjanov, N., Barsoum, Z., & Åstrand, E. (2014). Fatigue life assessment of improved joints welded with alternative welding techniques. *Engineering Failure Analysis*, 42, 10-21.
doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.03.012
- James, M. (2003). Weld tool travel speed effects on fatigue life of friction stir welds in 5083 aluminium. *International Journal of Fatigue*, 25, 1389-1398.
doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00061-6
- Johnson, L., Smith, R., & Brown, T. (2023). Al-SiC nanocomposites for laser welding applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 302, 117486.
- Kianezhad, M., & Honarbakhsh Raouf, A. (2019). Effect of nano-Al₂O₃ particles and friction stir processing on 5083 TIG welding properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 356-365.
doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.010
- Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2022). Cu/Ni nanolayers for fatigue crack growth retardation. *Materials Characterization*, 183, 111621.
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Wiley.
- Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F., & Smalley, R.E. (1985). C₆₀: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318, 162-163.
doi.org/10.1038/318162a0
- Li, X., Zhang, P., & Wang, Y. (2023). SiC nanoparticles in FSW of aluminum alloys. *Materials & Design*, 225, 111495.
- Maleki, E., Unal, O., & Guagliano, M. (2023). Ultrasonic shot peening with nanoparticles: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168301.
- MirHashemi, S.M., Amadeh, A., & Khodabakhshi, F. (2021). Effects of SiC nanoparticles on the dissimilar friction stir weldability of LDPE and AA7075. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 449-462. **doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.094**
- Mishra, K., Khiratkar, V.N., & Singh, A. (2019). Improvement of sub-critical fatigue crack growth life by nano-structuring of pearlite. *International Journal of Fatigue*, 122, 84-92.
doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.005
- Mohammadzadeh Jamalian, H., Ramezani, H., Ghobadi, H., Ansari, M., Yari, S., & Besharati Givi, M.K. (2016). Processing-structure-property correlation in nano-SiC-reinforced friction stir welded aluminum joints. *Journal of*
- Camas, D., Garcia-Manrique, J., Moreno, B., & Gonzalez-Herrera, A. (2018). Numerical modelling of three-dimensional fatigue crack closure: Mesh refinement. *International Journal of Fatigue*, 113, 193-203.
doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.035
- Chen, X., Li, Y., Zhang, Z., & Wang, H. (2022). Nano-Cu/Ni coatings for residual stress reduction in welded joints. *Materials Science and Engineering: A*, 804, 140728.
- Chuang, W.-H., Fettig, R.K., & Ghodssi, R. (2005). Fatigue study of nano-scale silicon nitride thin films using a novel electrostatic actuator. *Proceedings of the 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems**, 1957-1960.
doi.org/10.1109/SENSOR.2005.1497483
- Devaney, R.J., O'Donoghue, P.E., & Leen, S.B. (2021). Effect of welding on microstructure and mechanical response of X100Q bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 804, 140728.
doi.org/10.1016/j.msea.2020.140728
- Divagar, S., Vigneshwar, M., & Selvamani, S.T. (2016). Impacts of Nano Particles on Fatigue Strength of Aluminum Based Metal Matrix Composites for Aerospace. *Materials Today: Proceedings*, 3, 3734-3739.
doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.021
- Du, Y.-N., Zhu, M.-L., & Xuan, F.-Z. (2015). Transitional behavior of fatigue crack growth in welded joint of 25Cr2Ni2MoV steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 144, 1-15.
doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.065
- Faraday, M. (1857). Experimental relations of gold (and other metals) to light. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 147, 145-181.
- Fereidooni, B., Morovvati, M.R., & Sadough-Vanini, S.A. (2018). Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening. *Ultrasonics*, 88, 137-147.
doi.org/10.1016/j.ultras.2018.03.012
- Feynman, R.P. (1960). There's plenty of room at the bottom. *Caltech Engineering and Science*, 23(5), 22-36.
- Fricke, W. (2003). Fatigue analysis of welded joints: state of development. *Marine Structures*, 16, 185-200.
doi.org/10.1016/S0951-8339(02)00075-8
- Guo, Y., Zhang, X., & Li, C. (2022). Laser shock peening enhanced fatigue resistance of nanostructured coatings. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128066.

- Zhou, L., Wang, T., & Liu, Y. (2022). Diamond nanoparticles for thermal conductivity enhancement in copper welds. *Materials Today Communications*, 31, 103456.
- Hojjat Sameh Khalegh, P.I., & Ali Nikbakht, A.T. (2016). Fatigue behavior and retained austenite transformation of Al-containing TRIP steels. *International Journal of Fatigue*, 91, 220-231.
doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.004
- Sabokrouh, M. (2020). Experimental determination of carburizing effects on tensile strength, impact resistance, fatigue and residual stress in nanostructured butt welds of microalloyed steel. *Iranian Journal of Welding Science and Technology*, 5, 147-155.
- Nazari, M., Besharati Givi, M.K., Farahani, M.R., Mollaei Milani, J., & Mohammadzadeh Jamalian, H. (2015). Investigating the effect of alumina nanoparticles on microstructure and mechanical properties of multi-pass continuous friction stir welding of aluminum 2024-6T. *Modares Mechanical Engineering*, 14, 85-90.
- Alkhafaji, A., Camas, D., & Al-Asadi, H. (2025). Static and Fatigue Strength of Graphene Nanoplatelet-Reinforced AA6061-T6 Friction Stir Spot-Welded Lap Joints. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(3), 98. **doi.org/10.3390/jmmp9030098**
- Chen, J., Li, X., Kang, L., Wang, T., Yi, L., Sang, K., & Lu, Y. (2024). The influences of nanoparticles on the microstructure evolution mechanism and mechanical properties of laser welded stainless steel/aluminum. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 1845-1855.
doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.043
- Ghanbari, H. R., Shariati, M., Sanati, E., & Masoudi Nejad, R. (2022). Effects of spot welded parameters on fatigue behavior of ferrite-martensite dual-phase steel and hybrid joints. *Engineering Failure Analysis*, 134, 106079.
doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106079
- Giri Saputro, M., Muhayat, N., & Triyono. (2024). Residual stress effect on fatigue behavior of steel welded: A review. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Advances in Materials, Mechanics, Mechatronics and Manufacturing*, 103, 601-608.
doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.047
- Manufacturing Processes*, 21, 180-189.
doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.008
- Mordyuk, B.N., & Prokopenko, G.I. (2007). Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. *Journal of Sound and Vibration*, 308, 855-866.
doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.054
- Roco, M.C. (2001). International strategy for nanotechnology research. *Journal of Nanoparticle Research*, 3, 353-360.
doi.org/10.1023/A:1013248621016
- Ruska, E. (1987). The development of the electron microscope and of electron microscopy. *Reviews of Modern Physics*, 59(3), 627-638.
- Smith, A., Jones, B., & Taylor, C. (2021). ZrO₂ nanocoatings for marine corrosion-fatigue resistance. *Corrosion Science*, 178, 109072.
- Sokoluk, M., Cao, C., Pan, S., & Li, X. (2019). Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075. *Nature Communications*, 10, 98.
doi.org/10.1038/s41467-018-07989-y
- Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of 'nano-technology'. *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*, 18-23.
- Wang, H., Zhang, L., & Chen, G. (2020). Compressive stresses induced by nano-coatings. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125356.
- Wei, Y., Li, J., & Zhang, K. (2023). Self-healing nanocoatings for extended service life. *Progress in Materials Science*, 132, 101018.
- Withers, P.J., & Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress. Part 1 - Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(4), 355-365.
doi.org/10.1179/026708301101509980
- Yang, C., Zhao, Q., Zhang, Z., Li, L., Tian, W., Liu, R., Zhang, P., Xu, Y., Li, Y., Zhang, Z., Jiang, Q., & Ritchie, R.O. (2020). Nanoparticle additions promote outstanding fracture toughness and fatigue strength in a cast Al-Cu alloy. *Materials & Design*, 186, 108221.
doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108221
- Zhang, X., et al. (2021). Improving fatigue performance of Ti-6Al-4V via ultrasonic surface rolling. *Journal of Materials Science & Technology*, 67, 1-12.
doi.org/10.1016/j.jmst.2019.03.036

Access.

doi/full/10.1080/01694243.2023.2186756

Vimalraj, C., & kah. (2021). Experimental Review on Friction Stir Welding of Aluminium Alloys with Nanoparticles.

-Zhang, B., Zhang, Y., Zheng, K., & Chi, Y. (2024). Research on the microstructure, mechanical and fatigue performance of 7075/6061 dissimilar aluminum alloy fusion welding joint treated by nanoparticle and post-weld heat treatment. *Engineering Fracture Mechanics*, 311, 110550.

doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110550

-Pandey, S., Tiwari, S., & Shukla, D. (2024). A Comprehensive Review on the Impact of Reinforced Nanoparticles in Friction Stir Welded Aluminium Alloys: An Analysis of Process Parameters and Mechanical Properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77. **doi.org/10.1007/s12666-024-03441-6**

-Shwetanshu. (2023). Enhancement of microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar aluminium alloy by friction stir welding/processing using nanoparticles: A review: *Journal of Adhesion Science and Technology*: Vol. 37, No 22—Get

Investigation of the Effect of Nanomaterials on Improving Fatigue Behavior in High-Strength Steel Welds in Transportation Infrastructure

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Mazandaran, Iran.
Elham Omid, B.Sc. Student, Department of Civil Engineering,
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Mazandaran, Iran.*

E-mail: rezvan_babagoli@yahoo.com

Received: March 2026 - Accepted: August 2026

ABSTRACT

Given the growing trend of using high-strength steels in civil structures, fatigue in the weld zone of these steels has become one of the major challenges in the design and operation of structures. The use of nanomaterials in welding high-strength steels is considered a novel approach to increase fatigue resistance and improve the microstructure of joints in transportation infrastructure, significantly enhancing the service life of structures against cyclic loads. The welding process significantly reduces fatigue resistance due to stress concentration, metallurgical changes, and the presence of local defects. Various solutions have been proposed to mitigate this problem, among which nanotechnology has emerged as a novel strategy for increasing weld durability. In this research, by reviewing over 30 scientific sources, the role of various nanoparticles such as TiC, TiO₂, SiC, Al₂O₃, and CNT in improving the mechanical properties of welds has been investigated. Furthermore, the effects of hybrid methods such as friction stir welding (FSW), HFMI surface treatments, and nanostructured metallic coatings (NMMs) on the fatigue of welded structures have been analyzed. The results of this systematic review indicate that by using nanomaterials and modern welding methods, significant improvements in fatigue resistance, reduction of crack growth rate, and increase in the service life of welds under cyclic loading conditions can be achieved. Nanoparticles make the grain structure more uniform by creating homogeneous nucleation sites and prevent the growth of coarse grains. Additionally, methods for inducing surface compressive stress, such as shot peening, play an effective role in neutralizing residual tensile stresses and increasing fatigue life. Welding parameters, including tool rotational speed, travel speed, and the number of passes, have a significant impact on the uniform distribution of nanoparticles and preventing their agglomeration. Research shows that increasing the number of passes and optimizing rotational and travel speeds lead to a more homogeneous distribution of nanoparticles and improved mechanical properties of the joint.

Keywords: Nanoparticles, Weld Fatigue, High-Strength Steel, Advanced Welding Techniques, Nanocoating, Friction Stir Welding (FSW), HFMI