

مزایای اقتصادی استفاده از فناوری نانو در صنعت سیم‌جوش‌های توپودری



شناسنامه

ستاد توسعه فناوری های نانو و میکرو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهریژن	سال انتشار:	۱۴۰۴
نظارت:	داود قزایلو	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
پست الکترونیک:	IND@nano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir
تهیه کنندگان:	اشکان عبدشاهی، سروش صحرائیان		www.INDnano.ir
		اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

محتوای صنعتی و فناورانه خود را از طریق پست الکترونیک و پایگاه اینترنتی نانو و صنعت (INDnano.ir) ارسال نمایید.

فهرست مطالب

۳	معرفی
۶	مزایا
۷	تحلیل هزینه-فایده استفاده از نانوذرات در سیم جوش های توپودری
۱۰	شرکت های ایرانی تولیدکننده سیم جوش توپودری نانوساختار
۱۰	پی نوشت ها
۱۰	منابع

معرفی

سیم جوش یک ماده فلزی است که برای اتصال دو قطعه فلزی از جنس مشابه یا مختلف استفاده می‌شود [۱]. این سیم‌ها معمولاً شامل یک قطعه فولادی و یک پوشش محافظ برای حفاظت در برابر اکسیداسیون و دیگر عوامل مخرب هستند که انواع رایج آن‌ها عموماً به شرح زیر است [۲]:

■ **سیم جوش فولادی:** این نوع سیم جوش شامل یک قله فولادی بدون پوشش محافظ است که عموماً برای جوشکاری قطعات فولادی استفاده می‌شود [۳].

■ **سیم جوش الکترو:** این نوع سیم جوش حاوی پوشش الکترودی است که با استفاده از انرژی الکتریکی و بازوی جوشکاری به سرعت آبکاری شده و موجب ایجاد جوش بین دو قطعه فلزی می‌شود [۴].

■ **سیم جوش توپودری:** این نوع سیم جوش دارای یک محلول پودر فلزی است که با فشار و حرارت به شکل محلول فولادی تبدیل می‌شود و در نهایت جهت اتصال قطعات فلزی استفاده می‌شود [۵].

از سیم جوش‌های نوع فولادی بیشتر در جوشکاری قطعات فولادی همچون تعمیرات معمولی و تولید کارخانجات استفاده می‌شود که عموماً این نوع از سیم جوش‌ها دارای پوشش محافظی جهت جلوگیری از اکسیداسیون و سایر عوامل مخرب، نیستند. از طرفی سیم جوش‌های نوع الکترودی بیشتر در جوشکاری طراحی‌ها و ساخت قطعات فلزی ضخیم استفاده می‌شوند که پوشش الکترو که منبعی از آلیاژ فلزهای مختلف است، برای تقویت جوش و جلوگیری از اکسیداسیون فلز در منطقه جوشکاری، استفاده می‌شود [۴]. سیم جوش‌های نوع توپودری نیز بیشتر در جوشکاری قطعات فلزی نازک و حساس استفاده می‌شود که قابلیت بهبود جذب جریان الکتریکی، مقاومت در برابر هدررفت حرارت و خوردگی را به میزان بسیار خوبی دارا هستند، که در ترکیب آن‌ها از پودرهای فلزی مختلفی استفاده شده است. در این نوع سیم جوش که برای اولین بار در دهه ۱۹۴۰ و به عنوان یک روش جدید و مؤثر برای جوش فلزات معرفی شد، پودر فلزی به صورت توپودر درون یک پوسته فلزی قرار می‌گیرد که با استفاده از جریان الکتریکی این پودر ذوب شده و با قطعات فلزی اتصال قوی و محکمی برقرار می‌کند. همچنین، دما و سرعت ذوب شدن پودر فلزی به طور دقیق کنترل می‌شود که این امر منجر به افزایش کیفیت جوش می‌شود.



شکل ۱- نمایشی نزدیک از جوشکاری

سیم جوش توپودری بر اساس نوع پودر فلزی و قطعاتی که می خواهد جوش دهد به دسته هایی همچون سیم جوش توپودری آلومینیومی، فولادی، استنلس استیلی و... تقسیم بندی می شود. همچنین پارامترهای مهمی بر عملکرد و راندمان سیم جوش های توپودری تأثیرگذار هستند که از مهم ترین آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

■ بیرون زدگی سیم از نازل یا stick-out

اصطلاح «بیرون زدگی سیم از نازل» یا stick-out در جوشکاری با سیم جوش های توپودری به فاصله بین نوک نازل جوشکاری و انتهای سیم جوش بیرون زده اشاره دارد که عموماً محدوده ایده آل آن در بازه ۲-۱ سانتی متری قرار دارد [۶]. به عبارت دیگر، stick-out به طول قسمتی از سیم جوش که از انتهای نازل جوشکاری بیرون زده است، گفته می شود. این فاصله بیرون زدگی سیم جوش از نازل می تواند بر کیفیت و ثبات جوشکاری تأثیر داشته باشد. اگر این فاصله زیاد باشد باعث ایجاد گرمای بیش از حد در قوس جوش و احتمال ذوب شدن فلز پایه می شود. از طرفی اگر فاصله آن کم باشد، باعث کاهش گرمای قوس جوش و ایجاد مشکل در نفوذ و شکل گیری جوش می شود. بنابراین تنظیم صحیح و مناسب stick-out یا همان بیرون زدگی سیم از نازل یکی از عوامل مهم در کنترل کیفیت جوشکاری با سیم جوش های توپودری است.

■ میزان استحکام کششی و نقطه تسلیم

هرچقدر استحکام کششی در سیم جوش های توپودری افزایش یابد، مقدار مقاومت جوش در برابر نیروهای کششی افزایش خواهد یافت. این ویژگی باعث می شود جوش ایجاد شده مقاومت بیشتری در برابر نیروهای کششی و ضربه ای داشته باشد [۲]. همچنین استحکام کششی بالا به مقاومت جوش در برابر خستگی و شکست نیز کمک می کند.

از طرفی افزایش در میزان نقطه تسلیم در سیم جوش های توپودری امری مفید است، به این معنی که نقطه تسلیم بالا به معنی مقاومت بیشتر در برابر شروع تغییر شکل دائمی است [۳]. این ویژگی باعث می شود سیم جوش مقاومت بهتری در برابر کرنش و تغییر شکل داشته باشد. همچنین نقطه تسلیم بالا به پایداری ساختاری بهتر جوش، در برابر تنش های وارده کمک می کند.

در مجموع، استحکام کششی و نقطه تسلیم بالا در سیم جوش های توپودری باعث می شود این سیم جوش ها مقاومت مکانیکی و پایداری بهتری در برابر نیروها و تنش های وارده داشته باشند. به همین دلیل، افزایش این ویژگی ها عملکرد و کارایی بهتری را برای سیم جوش های توپودری به همراه خواهد داشت.

■ سختی

آزمون های سختی معیاری برای اندازه گیری مقاومت ماده در مقابل تغییر شکل پلاستیکی است که در حین اعمال فشار از سوی یک فروزنده (Indenter) در ماده ایجاد می شود. سختی بالا به معنی مقاومت بیشتر سطح جوش در برابر سایش و فرسایش است که این ویژگی باعث می شود طول عمر جوش افزایش یابد [۵]. همچنین سختی بالا به پایداری ساختاری بهتر جوش در برابر تغییر شکل و تنش ها کمک می کند که در

نتیجه، جوش با سختی بالاتر معمولاً استحکام کششی و خمشی بیشتری دارد. به طور کلی سختی بالا می‌تواند مزایای عملکردی مفیدی به همراه داشته باشد، اما افزایش بیش از حد آن ممکن است عملکرد را بدتر کند. بدین صورت که افزایش آن ممکن است باعث کاهش قابلیت شکل پذیری فلز جوشکاری شده شود. همچنین سختی بیش از حد می‌تواند خطر ترک خوردگی و شکستگی را افزایش دهد.

در تمام آزمون‌های سختی، نوعی فرورنده با شکل‌های مختلف (کروی، هرمی و...) با اعمال یک نیروی خارجی معین در سطح جسم فرو رفته و بر اساس میزان نیروی اعمالی و عمق فرو رفتن (ابعاد سطح در اثر فرو رفتن) عدد سختی جسم تعیین می‌شود. بنابراین جنس و ماهیت ماده، اندازه و نوع فرورنده و میزان نیروی اعمالی در تعیین عدد سختی مؤثر است. به همین خاطر روش‌های متعددی جهت تعیین سختی وجود دارد که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به راکول (HR)، برینل (HB)، ویکرز (HV)، نوپ (HK) و اسکروسکوپ (HS) اشاره کرد. به طور کلی روش جوشکاری توپودری بسیار سریع‌تر از روش‌های سنتی جوشکاری است و تولید پسماند و زمان مورد نیاز برای جوشکاری را کاهش می‌دهد که به همین خاطر این نوع سیم جوش به مؤثر بودن و کارایی بالایی در صنایع مختلف شهرت دارد. از طرفی مدل‌های قدیمی‌تر این نوع سیم جوش‌های توپودری ممکن است دارای مشکلاتی همچون مقاومت در برابر اشتعال پایین‌تر، کیفیت پایین‌تر، امکان خوردگی و شکست بیشتر و... باشند. در ادامه به برخی از این مشکلات اشاره شده است:

- **کیفیت جوش:** در سیم جوش‌های توپودری، گاهی انتظار نمی‌رود کیفیت جوش بسیار بالا باشد. این نوع سیم جوش‌ها ممکن است به سبب خوردگی، نقاط ضعفی در جوش ایجاد کنند که منجر به کاهش استحکام و مقاومت جوش می‌شوند و در نهایت شکست جوش را با خود به همراه خواهند داشت.
- **مشکلات حرارتی:** در سیم جوش توپودری، ممکن است توزیع ناهموار حرارت در جوش صورت بگیرد که می‌تواند به ایجاد نقاط ضعف و ناپایداری در جوش منجر شود.
- **بهره‌وری پایین:** سیم جوش توپودری ممکن است بهره‌وری کمتری نسبت به فناوری‌های جدیدتر نشان دهد چرا که کیفیت جوش، مقاومت و استحکام آن کمتر است.



شکل ۲- سیم جوش توپودری

به طور کلی، سیم جوش توپودری دارای معایبی است که با استفاده از فناوری های جدیدتر این معایب می توانند بهبود یابند و کیفیت و کارایی جوشکاری افزایش یابد.

یکی از انواع جدید و نوپای سیم جوش های توپودری، سیم جوش توپودری نانویی است که از مواد نانوذره ای در سنتز و تولید آن ها استفاده شده است [۷]. این نوع از سیم جوش ها به دلیل دارا بودن سطح بزرگ و فعالیت حرارتی بالاتر نسبت به سیم جوش های توپودری معمولی، می توانند بهبود قابل توجهی در عملکرد و کارایی جوشکاری داشته باشند [۸]. این موضوع به اثرات ذرات نانو ساختار در سیم جوش مربوط می شود بدین نحو که سیم جوش توپودری نانویی با کاهش اندازه ذرات در ابعاد نانومتری، دارای سطح بسیار بزرگی است که این امر باعث افزایش نقاط و سطح تماس بین جوش و قطعات فلزی می شود [۹]. با افزایش تعداد نقاط تماس و افزایش فعالیت سطحی، میزان جذب انرژی و انتقال حرارت افزایش می یابد که به طبع و به دنبال آن بهبود در جذب جریان الکتریکی، کاهش عیوب و ترک ها و افزایش مقاومت در برابر هدررفت حرارت، سایش و خوردگی را فراهم می کند [۱۰]. این ویژگی ها باعث می شود که سیم جوش توپودری نانویی نسبت به مدل غیرنانویی عملکرد و کارایی بهتری داشته باشد، به نحوی که این نوع سیم جوش های توپودری نانویی می توانند به عنوان یک گزینه بهتر با کارایی بالاتر در صنایع مختلفی همچون خودروسازی، هوافضا، الکترونیک و صنایع عمومی با افزایش بهبود در ضریب بهره وری آن ها، مورد استفاده قرار گیرند [۱۱].



مزایا

همان طور که در قسمت های پیشین عنوان شد، سیم جوش توپودری نانویی یک نوع سیم جوش پیشرفته است که با استفاده از ذرات نانویی با سطح بزرگتر، بهبودهای چشمگیری در عملکرد و کارایی جوشکاری ایجاد می کند. از همین رو در مقایسه با سیم جوش توپودری غیرنانویی، سیم جوش توپودری نانویی دارای مزایای فراوانی است که ارزش آن در صنعت جوشکاری قابل توجه است.

یکی از مزایای مهم سیم جوش توپودری نانویی، افزایش تعداد نقاط تماس بین سیم جوش و قطعات است. استفاده از نانوذرات در سیم جوش، سطح بزرگتری را فراهم می کند که بهبود چشمگیری در تماس بین سیم جوش و قطعات فلزی را فراهم می کند [۹]. این امر باعث افزایش قدرت پیچیدگی، استحکام و کیفیت جوش شده و

دقت جوشکاری را بالاتر می برد. از طرفی با استفاده از نانوساختارها یا نانوذرات در جوشکاری، می توان نرخ هدایت حرارتی را بهبود بخشید. بدین صورت که با افزودن نانوذرات و برخورداری از ویژگی هایی همچون نقطه ذوب پایین تر، توزیع حجمی یکنواخت تر، ساختار کریستالی بهتر و در نهایت برخورداری از سطح تماس بیشتر، نرخ انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین از آنجا که این نانوذرات دارای اندازه کمی در مقیاس نانومتری هستند، از تجمع گرما در نقاط خاصی جلوگیری می کنند.

سیم جوش توپودری نانویی به دلیل داشتن نانوذرات فلزی درون ماتریس پودر فلزی، کاهش عیوب و ترک ها را فراهم می کند. این امر بدین صورت تحقق می یابد که ذرات نانویی باعث بهبود جریان الکتریکی و کاهش هدررفت حرارت شده و در نتیجه ترک ها و عیوب در سطح جوشکاری کاهش می یابند. این موضوع باعث افزایش مقاومت در برابر خوردگی، افزایش مقاومت در برابر سایش های محیطی و در نهایت سبب افزایش عمر مفید قطعات جوش داده شده می شود که به دنبال آن کاهش در مصرف مواد اولیه و هزینه های تولید را با خود به همراه خواهد داشت [۱۲].



شکل ۳- مزایای استفاده از نانوذرات در سیم جوش های توپودری

تحلیل هزینه-فایده استفاده از نانوذرات در سیم جوش های توپودری

در جدول ۱ به مقایسه و ذکر مشخصات فنی دو نوع سیم جوش توپودری نانویی و غیرنانویی با مشخصات نسبتاً یکسان که هر دو مقاوم در برابر سایش و ضربه های بسیار شدید هستند، پرداخته شده است که تمامی مشخصات موجود در آن در طی تماس و ارتباط با واحد فروش هر نوع محصول به دست آمده است.

جدول ۱- مشخصات دو نوع سیم جوش توپودری نانویی و غیرنانویی مقاوم در برابر سایش

نوع سیم جوش	سختی (ویکرز)	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت تغذیه سیم (متر بر دقیقه)	بیرون زدگی سیم از نازل (stick-out) (سانتی متر)	قطر سیم جوش (میلی متر)
توپودری نانویی	۴۷۱-۵۳۱	۲۵۰-۲۰۰	۲۶-۲۹	۶	۲-۲٫۵	۱٫۶
توپودری غیرنانویی	۴۴۶-۴۸۴	۲۲۰-۱۸۰	۲۵-۲۷	۶	۲٫۵	۱٫۶

همان طور که از جدول ۱ پیداست، به واسطه استفاده از سیم جوش توپودری نانویی مقاوم به سایش در مقایسه با نوع غیرنانویی مقاوم به سایش، اگرچه نیاز به تأمین میزان جریان و ولتاژ بالاتری است، اما میزان سختی بیشتری از جوشکاری حاصل از آن به دست خواهد آمد که نقطه عطفی برای آن محسوب می شود. همچنین میزان نرخ بیرون زدگی سیم از نازل در سیم جوش توپودری نانویی در مقایسه با نوع غیرنانویی در بازه کمتری قرار دارد که حاکی از کیفیت و ثبات بالاتر این نوع سیم جوش به هنگام جوشکاری است.

در جدول ۲ لیست قیمت دو محصول سیم جوش توپودری نانویی و غیرنانویی درج شده است. از اطلاعات این جدول می توان به عنوان مقایسه ای از نوع هزینه فایده برای این دو نوع محصول موجود که یکی بر پایه نانوذرات و دیگری به صورت معمولی تولید شده اند، استفاده کرد.

جدول ۲- فرضیات تحلیل هزینه فایده^۲

نوع	قیمت هر کیلو (تومان)
سیم جوش توپودری نانویی	۷۰۰,۰۰۰
سیم جوش توپودری غیرنانویی	۹۰۰,۰۰۰

در جدول ۳ به بررسی هزینه فایده استفاده از دو نوع سیم جوش توپودری نانویی و غیرنانویی پرداخته شده است که شامل اطلاعاتی از قبیل قیمت، میانگین عمر مفید و میزان درصد حجمی بهینه شده این دو نوع محصول است. مطابق با جدول ۳ می توان دریافت که مقدار هزینه صورت گرفته جهت خرید و استفاده از سیم جوش توپودری نانویی نسبت به مدل غیرنانویی، تقریباً ۲۲٫۲ درصد کمتر است. همچنین برای انجام مقایسه و تعیین میزان عمر مفید سیم جوش توپودری نانویی و غیرنانویی و همچنین تعیین میزان اختلاف قیمت، از رابطه درصد حجمی استفاده می شود.

فرمول درصد حجمی بهینه شده برابر است با:

$$P_i = \frac{\sum C_w - \sum C_n}{\sum C_n} \times 100 \quad (1)$$

P_i : درصد حجمی بهینه شده در صورت استفاده از سیم جوش توپودری نانویی؛

C_w : هزینه موارد با فناوری نانو؛

C_n : هزینه موارد بدون فناوری نانو.

به عنوان مثال، درصد حجمی بهینه شده قیمت دو نوع سیم جوش توپودری مقاوم به سایش نانویی و غیرنانویی به روش زیر محاسبه می شود:

$$P_i = \frac{700,000 - 900,000}{900,000} \times 100 = -22.2\% \quad (2)$$

جدول ۳- بررسی هزینه- فایده استفاده از سیم جوش نانوئی و سیم جوش معمولی

عنوان	میزان مصرف (کیلوگرم)	قیمت (تومان)	میانگین عمر مفید (سال)	درصد حجمی بهینه شده خرید سیم جوش توپودری	عمر مفید
سیم جوش توپودری نانوئی	۱	۷۰۰,۰۰۰	۸-۱۲	-۲۲,۲٪	+۳۳,۳٪
سیم جوش توپودری معمولی	۱	۹۰۰,۰۰۰	۵-۱۰		
اختلاف قیمت و عمر مفید			۲,۵ سال	۲۰۰,۰۰۰ تومان	

مطابق با جدول ۳ تفاوت قیمت دو محصول نانوئی و غیرنانوئی ۲۲,۲٪ است که به میزان ۲۰۰,۰۰۰ تومان سیم جوش توپودری نانوئی مقاوم به سایش نسبت به مدل غیرنانوئی ارزان تر است. همچنین عمر مفید سیم جوش توپودری نانوئی که می تواند با کیفیت و بدون افت عملکرد مورد استفاده قرار گیرد، معمولاً در بازه ۸-۱۲ سال و برای سیم جوش توپودری غیرنانوئی در بازه ۵-۱۰ سال است که از این حیث محصول نانوئی به طور متوسط ۳۳,۳ درصد عمر مفید بیشتری نسبت به محصول غیرنانوئی دارد.

به عنوان مثال اگر یک مسیر ۱۰,۰۰۰ کیلومتری را جهت عبور قطار بخواهیم ریل گذاری کنیم (که تقریباً معادل ۶۳٪ میزان خطوط ریلی فعلی کشور است)، جهت اتصال قطعات مختلف آن به یکدیگر حدود ۲۰۰,۰۰۰ کیلوگرم سیم جوش توپودری مورد نیاز است که مطابق با رابطه (۳) میزان مابه التفاوت هزینه جوشکاری در صورت استفاده از سیم جوش توپودری نانوئی مقاوم به سایش نسبت به سیم جوش توپودری غیرنانوئی به شرح زیر خواهد بود [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]:

$$(3) \quad \text{میزان تفاوت قیمت دو محصول نانوئی و غیرنانوئی} = 200,000 \times 200,000 = 40,000,000,000$$

این رقم بدان معنی است که اگر قیمت میانگین هر تاکسی شهری را معادل ۵۰۰,۰۰۰,۰۰۰ تومان در نظر بگیریم، با استفاده از مابه التفاوت هزینه جوشکاری دو مدل سیم جوش توپودری نانوئی و غیرنانوئی مطابق با رابطه (۴)، می توان ۸۰ عدد از این تاکسی ها را خریداری کرد و تحویل جامعه داد:

$$(4) \quad \text{تعداد اتوبوس قابل خرید از مابه التفاوت قیمت دو محصول نانوئی و غیرنانوئی} = 40,000,000,000 \div 500,000,000 = 80$$

شرکت های ایرانی تولیدکننده سیم جوش توپودری نانو ساختار



شرکت توسعه فناوری نمد

آدرس: تهران، احمدآباد مستوفی، بعد از میدان پارسا، انتهای خیابان انقلاب،

خیابان شهید احسانی راد، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، سالن

۸ واحد ۸

تلفن: ۰۲۱۵۶۲۷۶۶۲۷

ایمیل: info@namadnanotech.com

وبسایت: www.namadnanotech.com

پی نوشت ها

۱- درباره کلمه «قله»، منظور قسمت نازک و تیز سیم جوش یا اندازه مشترک سیم جوش است که به وسیله جریان الکتریکی یا پلاسما گرمای غنی به قطعات متصل شده و جوشکاری صورت می گیرد.

۲- قیمت ها مربوط به سال ۱۴۰۳ است.

منابع

- ۱- P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, "Advanced gas metal arc welding processes," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 67, no. 1-4, pp. 655-674, Jul. 2013, doi: 10.1007/S00170-012-4513-5/METRICS.
- ۲- J. R. Davis, "Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining," Welding, Brazing, Solder., pp. 789-829, Dec. 1993, doi: 10.31399/ASM.HB.V06.A0001442.
- ۳- D. L. Xizhang Chen a b, Yuanyuan Fang a, Peng Li a, Zhenzhen Yu c, Xiaodong Wu a, "Microstructure, residual stress and mechanical properties of a high strength steel weld using low transformation temperature welding wires," 2015, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.013>
- ۴- A. L. LF Jeffus, HV Johnson, Welding: principles and applications. 1999.
- ۵- J. Tušek and M. Suban, "High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition," J. Mater. Process. Technol., vol. 133, no. 1-2, pp. 207-213, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00235-2.
- ۶- "Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding," 2005. <https://pdfcoffee.com/aws-a529-pdf-free.html>
- ۷- D. Oropeza et al., "Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire," J. Alloys Compd., vol. 834, p. 154987, Sep. 2020, doi: 10.1016/J. JALLCOM.2020.154987.
- ۸- A. A.-I. M. GN Sokolov, IV Zorin, "Structure formation and properties of weld alloys with addition of refractory compound nanoparticles," 2015.

منابع

- ۹ M. Zhang, Y. Han, C. Jia, Z. Zheng, H. Li, and C. Wu, "Improving the microstructures and mechanical properties with nano-Al₂O₃ treated wire in underwater submerged arc welding," J. Manuf. Process., vol. 74, pp. 40–51, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.11.056.
- ۱۰ C. Vimalraj, P. Kah, P. Layus, E. M. Belinga, and S. Parshin, "High-strength steel S960QC welded with rare earth nanoparticle coated filler wire," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 102, no. 1–4, pp. 105–119, May 2019, doi: 10.1007/S00170-018-3059-6/METRICS.
- ۱۱ M. A. Kuznetsov and E. A. Zernin, "The Current State of Application of Ultra- and Nanostructured Powders in Technologies in Welding Technologies (Review)," Mater. Sci. Forum, vol. 927, pp. 20–28, Jan. 2018, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.927.20.
- ۱۲ S. Zhang, X. Xu, T. Lin, and P. He, "Recent advances in nano-materials for packaging of electronic devices," J. Mater. Sci. Mater. Electron., vol. 30, no. 15, pp. 13855–13868, Aug. 2019, doi: 10.1007/S10854-019-01790-3/METRICS.
- ۱۳ "Recommended Practices for The Welding of Rials and Related Rail Components for Use by Rail Vehicles (Historical)." <https://pubs.aws.org/p/190/d1522003-recommended-practices-for-the-welding-of-rails-and-related-rail-components-for-use-by-rail-vehicles-historical>
- ۱۴ "Rail Welding Equipment." <https://www.pandrol.com/product-lines/rail-welding-equipment/>
- ۱۵ "Thermit Welding Consumables." <https://www.railweld.com.cn/>
- ۱۶ <https://snn.ir/fa/news/1118567>

از مجموعه گزارش های صنعتی فناوری نانو که در صنایع فلزی منتشر شده است:



■ کاربردهای نانولوله های کربنی در صنایع فلزی



■ کاربردهای فناوری نانو در متالورژی پودر