

کاربرد تکنولوژی پلاسما در مهندسی ساخت و تولید^۱

موسی ساجد^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۳/۱۲/۱۹

تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۷/۰۴

چکیده

امروزه به تدریج روش‌های سنتی ساخت و تولید در حال جایگزینی با روش‌های نوین تولید است که در ایران با نام «تولید مخصوص» شناخته می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در حوزه فیزیک مانند توانایی کنترل امواج فراصوت، لیزر، باریکه الکترون، تخلیه الکتریکی و قوس پلاسما توجه مهندسين مکانیک را به سمت استفاده از این دانش‌های جدید در تکنولوژی ساخت قطعات صنعتی معطوف داشته است. در این میان پلاسما نقشی برجسته در این حوزه دارد. قوس پلاسما نه تنها به صورت مستقیم در فرآیندهای تولیدی همچون جوشکاری و برش کاربرد دارد بلکه در کنترل سایر روش‌های نوین تولید از جمله ماشینکاری و جوشکاری با استفاده از لیزر و ماشینکاری با تخلیه الکتریکی نیز نقش برجسته‌ای دارد. در این مقاله سعی شده است آخرین دستاوردهای دانش مهندسی در کاربرد پلاسما جمع‌بندی شود.

واژه‌های کلیدی: پلاسما، تولید مخصوص، جوشکاری، ماشینکاری

^۱ شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/jap.2017.4404.

^۲ مربی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان؛ sajed@azaruniv.edu

مقدمه

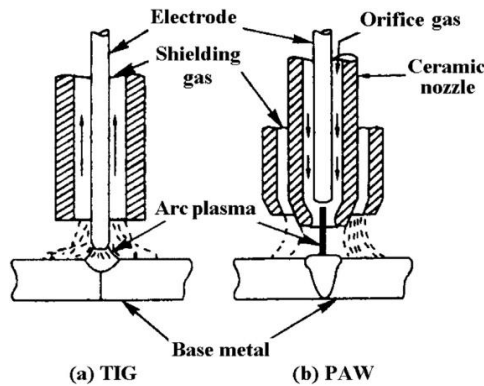
همکاری مهندسين و فزيكدانان در چند دهه اخير منجر به پيشرفت خيره كننده تكنولوژی‌های ساخت و توليد در جهان شده است. تكنولوژی‌های جديد مواد با سختی بالا و پرفیل‌های پیچیده را با دقتی باورنکردنی ماشینکاری می‌کنند. موادی که تا مدت‌ها گمان می‌شد قابلیت جوشکاری را ندارند با استفاده از روش‌های نوین جوشکاری با استحکام فوق‌العاده‌ای به هم متصل می‌شوند و ورق‌های ضخیم با سرعت بالایی برش داده می‌شوند. ماشینکاری با تخلیه الکتریکی، ماشینکاری با باریکه الکترون، ماشینکاری و جوشکاری با باریکه لیزر، ماشینکاری با امواج فراصوت، برش با جت آب، ماشینکاری الکتروشیمیایی و جوشکاری و برش با استفاده از قوس پلاسما را می‌توان مهم‌ترین تکنولوژی‌های تولید مخصوص دانست.

قوس پلاسما به دلیل حرارت بالا تکنیک منحصربفردی برای جوشکاری قطعات رسانای جریان الکتریسیته محسوب می‌شود. همچنین از این تکنیک برای برش ورق‌های فلزی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای قوس پلاسما در مهندسی ساخت و تولید پیش‌گرم کردن قطعات قبل از ماشینکاری [۱]، پوشش‌دهی ابزارهای تراشکاری [۲] و نمونه‌سازی سریع [۳] را می‌توان اشاره نمود. علاوه بر کاربردهای مستقیم پلاسما، شناخت و کنترل پلاسمای ایجاد شده در حین سایر فرآیندهای تولیدی مانند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی [۴] و جوشکاری و ماشینکاری به کمک لیزر [۵، ۶] تاثیر تعیین‌کننده‌ای در کنترل فرآیندهای مذکور دارد. در بخش‌های بعدی هر کدام از کاربردهای ذکر شده به همراه آخرین دستاوردهای ارایه شده است.

جوشکاری قوس پلاسما

یونیزه شدن یک گاز باعث رسانا شدن آن می‌شود. پلاسما فازی از ماده است که مابین دو الکتروود در هر قوس تشکیل می‌شود. در جوشکاری با قوس پلاسما فلزات با حرارت ایجاد شده توسط قوس پلاسما که بین یک الکتروود تنگستنی و فلز ایجاد می‌شود ذوب شده و جوش می‌خورد. جوشکاری با قوس پلاسما بسیار شبیه به جوشکاری گازی است چرا که این فرآیند نیز از یک الکتروود تنگستنی غیرمصرفی و یک گاز محافظ مثل آرگون استفاده

می‌کند. در جوشکاری گازی الکتروود تنگستنی بیرون از نازل گاز محافظ قرار می‌گیرد این در حالی است که در جوشکاری پلاسما الکتروود در داخل نازل قرار دارد. شکل (۱)، تصویر شماتیک تورچ جوشکاری گازی و جوشکاری پلاسما را نشان می‌دهد. در جوشکاری پلاسما، قوس پلاسما به شدت محدود می‌شود و تنها مقدار کمی از جریان گاز خالص آرگون مجاز است تا از اریفس داخلی که الکتروود تنگستنی را در بر گرفته است برای شکل دادن گاز پلاسما خارج شود. به دلیل عمل فشرده سازی نازل، قوس در جوشکاری پلاسما مستقیم و متمرکز است. این تمرکز حرارت واحد حجم قوس پلاسما را افزایش می‌دهد به طوری که دمای ۱۱۰۰۰ درجه سلسیوس در جوشکاری پلاسما غیر معمول نیست.



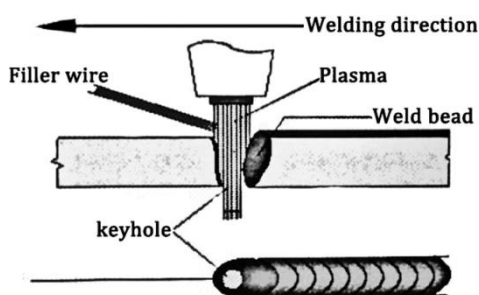
شکل ۱. مقایسه تورچ جوشکاری گازی با جوشکاری پلاسما [۷]

برای شروع قوس در جوشکاری پلاسما یک قوس پایلوت با جریان پایین بین الکتروود و نازل ایجاد می‌شود که گاز پلاسمای جاری از داخل نازل را یونیزه می‌کند. این گاز به دماهای بسیار بالا می‌رسد که مسیری با مقاومت کم برای شروع قوس پلاسما بین الکتروود و قطعه کار ایجاد می‌کند. این قوس از داخل نازل عبور کرده و مسیرش را ادامه می‌دهد تا به فلز پایه برسد که باعث ایجاد یک مسیر با مقاومت کم برای عبور جریان مابین الکتروود تنگستنی و فلز پایه می‌شود. قوس پلاسما به دلیل محدودیت ایجاد شده توسط اریفس دارای دما و سرعت بالایی است که قابلیت ذوب و اتصال فلزات را دارد. چون گاز پلاسما

خود قادر به حفاظت از حوضچه مذاب نیست، حجم بالایی از گاز خنثی توسط نازل خارجی که نازل داخلی را در بر گرفته است به سطح جوش دمیده می‌شود. گازهای محافظ قابل استفاده آرگون و هلیوم هستند.

دو روش در جوشکاری پلاسما وجود دارد که شامل روش ذوبی و روش نفوذی است. وقتی انرژی توسط قوس پلاسما به قطعه انتقال داده می‌شود توسط سطح قطعه جذب شده و با ترکیبی از رسانش حرارت قوس و تبدیل انرژی دینامیکی آن به انرژی گرمایی، به سرعت موجب افزایش دما می‌شود. اگر سرعت انرژی منتقل شده از سرعت انرژی تلف شده به صورت رسانش بیشتر باشد دما افزایش یافته و جوشکاری ذوبی اتفاق خواهد افتاد. این روش جذب انرژی و جوشکاری به نام روش ذوبی یا رسانشی شناخته می‌شود.

اگر چگالی انرژی دریافتی از قوس به اندازه کافی بالا باشد، سرعت جذب آن بسیار بیشتر از سرعت اتلاف آن توسط رسانندگی قطعه کار خواهد بود. در این حالت قوس می‌تواند در حوضچه مذاب نفوذ کرده و یک حفره کوچک در آن ایجاد کند که با عنوان «کلید حفره» شناخته می‌شود. حرکت تورچ و کلید حفره ناشی از آن باعث جریان یافتن فلز مذاب اطراف حفره به عقب می‌شود جایی که مذاب دوباره منجمد شده و گرده جوش را تشکیل می‌دهد. این روش، روش نفوذی در جوشکاری پلاسما است. روشن است که در این روش عمق نفوذ جوش بیشتر از حالت ذوبی است. شکل (۲)، جوشکاری نفوذی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. جوشکاری پلاسمای نفوذی [۷]

قوس استفاده شده در جوشکاری پلاسما با یک نازل کوچک محدود شده و سرعت و شدت حرارت ورودی آن بسیار بالاتر از جوشکاری قوسی گازی با الکتروود تنگستنی است

(۳۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بر ثانیه و 10^9 تا 10^{10} وات بر مترمربع). در نتیجه جوشکاری پلاسما مزایای فراوانی نسبت به جوشکاری گازی به شرح زیر دارد:

۱. جوشکاری پلاسما سرعت بالاتر، تمرکز بیشتر انرژی و بازدهی بالاتری نسبت به جوشکاری گازی دارد که باعث شده است یکی از پربازده ترین فرآیندها برای بسیاری از کاربردها باشد. جوشکاری پلاسما نفوذ بیشتری نسبت به جوشکاری گازی دارد و در نوع نفوذی، این روش در قطعات نسبتاً ضخیم می تواند جوش با عمق نفوذ کامل را نتیجه دهد.

۲. جوشکاری پلاسما یک روش جوشکاری قوسی است که از یک الکتروود غیر مصرفی از جنس تنگستن یا آلیاژهای آن استفاده می کند. قرار گرفتن الکتروود در داخل نازل یک مزیت برای این روش است چرا که از کثیف شدن نازل جلوگیری می کند که به نوبه خود باعث افزایش عمر الکتروود می شود. معمولاً یک الکتروود بدون سنگ زنی می تواند در یک شیفت کاری کامل مورد استفاده قرار گیرد.

۳. در جوشکاری پلاسما می توان تلرانس بزرگی برای فاصله بین قطعاتی که باید به هم جوش شوند در نظر گرفت. همچنین این روش قادر به جبران عدم هم محوری ها می باشد. اگرچه قطر قوس محدود است ولی قطر ستون پلاسما به طور قابل توجهی بیشتر از باریکه الکترون و لیزر است، در نتیجه در مقایسه با روش های فوق، جوشکاری پلاسما نیاز کمتری به آماده سازی قبل از جوش داشته و نیاز به کاربرد فیلر را کم می کند و یا از بین می برد.

۴. نسبت بالای عمق به عرض جوش در جوشکاری پلاسما در مقایسه با جوشکاری گازی به طرز قابل توجهی اعوجاج زاویه ای و تنش پسماند را کاهش می دهد. منطقه کوچکتر متاثر از حرارت، عیوب داخلی کمتر و ویژگی های جوشکاری بهتر این روش را برای جوشکاری قطعاتی که سمت مقابل آنها به سختی قابل جوشکاری است (مانند مخازن آب بندی شده و لوله های با قطر کم) مناسب می کند.

اگرچه جوشکاری پلاسما می تواند در بسیاری از کاربردهایی که نیاز به اتصال دقیق دارند جایگزین جوشکاری گازی شود، اما نیاز به خنک کاری تورچ توسط آب در این روش، کوچک سازی تورچ را محدود می کند در حالی که تورچ جوشکاری گازی را

می‌توان بسیار کوچک‌تر ساخت چرا که قابلیت خنک‌کاری با گاز را دارد. از طرف دیگر تجهیزات لازم برای جوشکاری پلاسما پیچیده‌تر و گران‌تر از تجهیزات جوشکاری گازی است. نه تنها مولد قدرت و تجهیزات کنترل الکتریکی در این روش پیچیده‌تر از جوشکاری گازی است بلکه تنظیم خود دستگاه و پارامترهای جوشکاری نیز مشکل‌تر بوده و نیاز به الزامات خاص برای نصب تنگستن، نازل و تورچ دارد.

همانطور که گفته شد جوشکاری پلاسما بر اساس اینکه ستون پلاسما داخل حوضچه مذاب نفوذ می‌کند یا خیر، به دو روش ذوبی و نفوذی به کار برده می‌شود. روش ذوبی با قوسی کمتر متمرکز شده و سرعت جریان گاز پلاسمای پایین‌تر، فاصله کمتر الکتروود تا نازل و جریانی در محدوده تقریبی ۱ تا ۲۰۰ آمپر کاربرد دارد که این امر موجب عریض‌تر شدن گرده جوش در مقایسه با زمانی است که ستون پلاسما متمرکز می‌شود. اما در اکثر موارد، سرعت جوشکاری مساوی یا بالاتر از جوشکاری گازی است. ویژگی‌های قوس در این روش مشابه جوشکاری گازی و در بسیاری از کاربردها بهتر از آن است. این روش برای جوشکاری یک‌طرفه صفحات نازک و دوطرفه در صفحات ضخیم به کار می‌رود. معمولاً وقتی جریان کمتر از ۳۰ آمپر باشد جوشکاری پلاسمای ذوبی با عنوان جوشکاری میکروپلاسما شناخته می‌شود.

جوشکاری پلاسمای نفوذی معمولاً با قوس متمرکز انجام می‌شود و با افزایش سرعت گاز پلاسما و فاصله الکتروود از نازل، ستون پلاسما در کل ضخامت ورق نفوذ کرده و نیروی آن باعث جابجایی مواد در حوضچه مذاب شده و خط جوش را شکل می‌دهد. معمولاً این روش برای جوشکاری ورق‌هایی با ضخامت ۲/۴ تا ۸ میلیمتر که نیاز به نفوذ جوش در کل ضخامت ورق و انجام جوشکاری در یک پاس را دارند به کار برده می‌شود. شکل (۳)، تصویری از نمونه واقعی جوشکاری شده به این روش را نشان می‌دهد.



(a)Topside



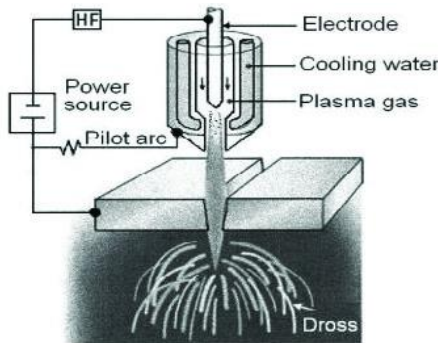
(b)Backside

شکل ۳. نمونه جوشکاره شده با روش پلاسمای نفوذی [۷].

در مقایسه با جوشکاری لیزر و جوشکاری با اشعه الکترونی، جوشکاری پلاسمای نفوذی بسیار مقرون به صرفه تر است، چرا که نیاز به آماده سازی کمتری دارد، چگالی انرژی آن پایین تر بوده و حفره ایجاد شده در حوضچه مذاب عریض تر است و بنابراین کاربرد این روش در جوشکاری فولادهای ساختمانی، خودروها، هواپیماها، موشک ها، شاتل ها و احتمالاً جوشکاری در فضا افزایش یافته است [۷].

برشکاری با قوس پلازما

برش با قوس پلازما یک روش تولید مخصوص است که قابلیت اعمال به بسیاری از مواد رسانا را دارد. فولاد ضدزنگ، فولاد منگنزدار، آلیاژهای تیتانیوم، مس، منیزیم، آلومینیوم و آلیاژهای آن و چدن قابلیت برش به این روش را دارند. اصول برشکاری با قوس پلازما همانند جوشکاری است با این تفاوت که از انرژی قوس پلازما برای ذوب و ایجاد یک خط جدایش در قسمتی از یک قطعه که معمولاً یک ورق فلزی است و جدا کردن آن از سایر بخش های قطعه، استفاده می شود. شکل (۴)، تجهیزات برش پلازما را نشان می دهد.



شکل ۴. برشکاری با قوس پلازما [۸].

برش با پلازما تقریباً ۳۰ سال پیش برای آلیاژهایی که با روش های معمولی به سختی ماشینکاری می شوند به کار گرفته شده است. برش پلازما توسط یک قوس الکتریکی که بین الکترود و قطعه کار ایجاد می شود کار می کند. الکترود به عنوان کاتد و قطعه کار به عنوان آنود به کار گرفته می شود. این روش چندان جدید نیست اما اطلاعات مرتبط آن

بیشتر توسط مدارک ثبت اختراع به چاپ رسیده است تا مقالات علمی [۸]. برشکاری پلاسما در ابتدا با استفاده از هوا انجام یافته و در ادامه برشکاری با استفاده از این روش در زیر آب و در نهایت برشکاری دقیق از پیشرفت‌های اخیر این روش برشکاری می‌باشد.

پوشش‌دهی با پلاسما

به دلیل سختی سطحی پایین و مقاومت به سایش پایین ابزارهای برشی کاربرد سمانته در مقایسه با سایر ابزارها، عمر کاری این ابزارها کم است. اصلاح سطح ابزارها با روش‌های مختلف و از جمله پوشش‌دهی سطحی روش مناسبی برای افزایش عمر این ابزارها است. نیترات تیتانیوم و کاربرد تیتانیوم به طور گسترده‌ای به دلیل سختی بالا و پایداری شیمیایی بالا به عنوان پوشش سطحی به کار برده می‌شوند. در دهه‌های اخیر کربونیترات تیتانیوم به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی و به ویژه ماشینکاری مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های متداول پوشش‌دهی کربونیترات مشکلاتی از قبیل انجام فرآیند در دماهای بالا (۷۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس)، مشکلات زیست محیطی، چسبندگی پایین فیلم سطحی و ماده اصلی و سرعت پایین پوشش‌دهی را به دنبال دارند.

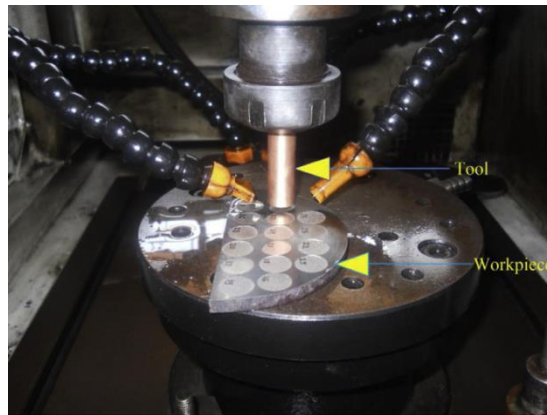
با ویژگی‌های منحصر بفردی همچون سرعت محوری بالا، چگالی انرژی بالا و زمان پایین پالس، استفاده از «پلاسمای پالسی با چگالی انرژی بالا» روش موثری برای آماده‌سازی فیلم‌هایی با ساختار نانو و با چسبندگی بالا ایجاد می‌کند. این روش در دمای اتاق انجام می‌گیرد و دوستاندار محیط زیست است و از نظر ترمودینامیکی برای لایه‌گذاری فیلم‌های با سختی بالا و مرکب مناسب‌تر است [۲].

پلاسما و ماشینکاری با تخلیه الکتریکی

ماشینکاری با تخلیه الکتریکی یک فرآیند با کارایی بالا است که برای ماشینکاری مواد سخت و شکل‌های پیچیده به کار برده می‌شود. در این روش که برای مواد رسانا کاربرد دارد از یک الکترود مسی یا گرافیتی استفاده می‌شود. با شکسته شدن دی‌الکتریک مابین الکترود و قطعه تخلیه الکتریکی مابین ابزار و قطعه کار اتفاق می‌افتد که باعث تبخیر

موضعی قسمتی از قطعه کار شده و با ادامه فرآیند، معکوس شکل ابزار بر روی قطعه کار ماشینکاری می‌شود. شکسته شدن دی الکتریک که معمولا یک مایع هیدروکربنی است و تخلیه الکتریکی که به صورت پالسی انجام می‌شود با ایجاد یک کانال پلاسما اتفاق می‌افتد. شکل (۵)، نمایی از ماشینکاری با تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد.

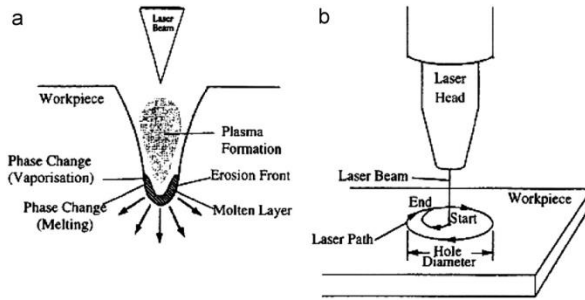
سرعت پایین ماشینکاری، سایش ابزار و مشکلات به وجود آمده در سطح قطعه کار به عنوان مهم‌ترین مشکلات این روش ماشینکاری مطرح است که به طور گسترده‌ای به فاکتوری به نام «کارایی فشار پلاسما» بستگی دارد. کارایی فشار پلاسما را می‌توان به عنوان عامل اصلی موثر بر پارامترهای خروجی فرآیند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی مانند سرعت ماشینکاری، سایش ابزار و ساختار سطحی قطعه در نظر گرفت. کارایی فشار پلاسما خود تابع پارامترهای ورودی فرآیند است که از بین آن‌ها جریان پالس و پالس به موقع مهم‌ترین پارامترها هستند.



شکل ۵. ماشینکاری با تخلیه الکتریکی [۹].

پلاسما و ماشینکاری لیزر

امروزه ماشینکاری با باریکه لیزر به طور گسترده‌ای به عنوان یک ابزار قدرتمند برای میکرو ماشینکاری مانند برش، سوراخکاری، شیازنی، تمیزکاری سطحی و جوشکاری استفاده می‌شود. اما به عنوان یک روش غیر تماسی، کنترل ماشینکاری لیزر کاملا متفاوت از ماشین ابزارهای سنتی است. شکل (۷)، نحوه ماشینکاری لیزر را نشان می‌دهد.



شکل ۷. ماشینکاری با لیزر و شکل‌گیری پلاسما [۱۰].

برای ماشینکاری لیزر به دلیل عدم وجود اندیکاتور مناسب، تمایل به استفاده از کنترل مدار باز وجود دارد. این در حالی است که سیستم کنترل مدار بسته در سیستم‌های دقیق «کنترل عددی با کامپیوتر» کاربرد دارد. سیستم کنترل مدار باز برای فرایندهایی مانند برش و سوراخکاری در کل ضخامت قطعه مناسب است، چون در صورت نیاز به هرگونه فیدبک نور عبوری از طرف مقابل قطعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ظاهر شدن نور می‌تواند به عنوان یک سیگنال برای اتمام فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در صورت ماشینکاری یک سوراخ کور یا یک پروفیل سطحی به منظور کنترل فرآیند در صورت استفاده از یک سیستم کنترل مدار باز نیاز به اعمال یک سری اندازه‌گیری برای کنترل پیشرفت فرآیند قبل از کامل شدن آن است. در میکروماشینکاری این نوع از اندازه‌گیری‌ها معمولاً با دستگاه‌های خاصی انجام می‌شود که نیاز دارد قطعه از دستگاه ماشینکاری خارج شده و پس از اندازه‌گیری مجدداً تنظیم شود. این روش نه تنها زمان‌بر است بلکه باعث می‌شود تا خطاهای غیرقابل پیش‌بینی در ماشینکاری ایجاد شود. همینطور برای تولید انبوه به روش میکروماشینکاری که پارامترهای مناسب فرآیند را می‌توان با انجام چند تست بر قطعات نمونه به دست آورد سیستم کنترل باز همچنان چندان قابل اعتماد نخواهد بود، چرا که از قطعه‌ای به قطعه دیگر ویژگی‌های ماده عوض می‌شود و شرایط ماشینکاری تغییر می‌کند. بنابراین ماشینکاری یکسان نیازمند سیستم کنترل مدار بسته است.

دلیل اصلی استفاده از ماشینکاری لیزر به صورت کنترل مدار باز عدم حضور یک پارامتر به عنوان سیگنال قابل اندازه‌گیری برای تعیین شرایط ماشینکاری است. در این مقاله

ما این نوع از سیگنال را یک اندیکاتور می‌نامیم. اندیکاتورهای مورد استفاده در سیستم‌های ماشینکاری با کنترل کامپیوتری عبارتند از گشتاور، نیروی پیشروی، ارتعاشات التراسونیک، جریان موتور اسپیندل، سرعت برشی، سرعت پیشروی، جریان موتور پیشروی و... است. این اندیکاتورها نه تنها برای ارایه فیدبک از پیشرفت ماشینکاری مناسب‌اند بلکه برای پایش وضعیت ابزار مانند سایش و شکست دفعی نیز مفید هستند.

متأسفانه هیچ یک از اندیکاتورهای فوق به دلیل غیرتماسی بودن فرآیند ماشینکاری لیزر قابلیت اعمال به آن را ندارند. سنسورهای جریان قادر به ارایه اطلاعات از پیشرفت ماشینکاری نیستند. خروجی میکروماشینکاری لیزر مانند عمق شیار یا سوراخ ایجاد شده معمولاً به صورت آفلاین و با روش‌های پیچیده مانند استفاده از میکروسکوپ الکترونی کنترل می‌شوند. واضح است یک روش آفلاین نمی‌تواند به عنوان اندیکاتور برای کنترل مدار بسته مورد استفاده قرار گیرد.

چانگ و همکارانش گزارش داده‌اند که «پلاسمای فعال شده با لیزر» می‌تواند به عنوان یک اندیکاتور در یک سیستم کنترل مدار بسته مورد استفاده قرار گیرد. پلاسمای فعال شده توسط لیزر پدیده رایجی در کاربرد لیزر است. زمانی که فوتون‌های لیزر توسط توسط الکترون‌های داخل اتم جذب می‌شوند، انرژی فوتون به انرژی جنبشی الکترون‌ها و ذرات نانو تبدیل می‌شود. این ذرات پس از جدا شدن از سطح نمونه به سرعتی بالغ بر ۱۰۰ متر بر ثانیه و یا حتی 10^4 متر بر ثانیه می‌رسند. دمای این ذرات به راحتی می‌تواند تا ۲۰۰۰ درجه کلوین بالا رود تا پلاسما را شکل دهند. نور ایجاد شده را به عنوان نتیجه پلاسما می‌توان مشاهده نمود. طول موج این نور با طول موج نور لیزر متفاوت است و زمان آن بسیار بیشتر از لیزر پالسی است که استفاده از آن به عنوان یک اندیکاتور برای کنترل مدار بسته فرآیند را ممکن می‌کند [۵].

جمع بندی

با توجه به اطلاعات ارایه شده در این مقاله روشن است که پلاسما کاربرد وسیعی چه به طور مستقل و چه در کنترل سایر فرآیندهای تولیدی پیدا کرده است. مهم‌ترین کاربرد پلاسما کاربرد آن در جوشکاری است و در سایر حوزه‌ها مانند برشکاری نیز به طور

گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر به دلیل ایجاد پلاسما در سایر روش‌های تولید مخصوص، مطالعه آن در کنترل سایر فرآیندها نیز ضروری است.

معادل انگلیسی اصطلاحات به کار رفته در متن

Keyhole plasma arc welding	جوشکاری پلاسما نفوذی	Plasma Arc Welding (PAW)	جوشکاری قوس پلاسما
Keyhole	کلیدحفره	Tungsten-Inert Gas welding (TIG)	جوشکاری گازی
Plasma Arc Cutting (PAC)	برش با قوس پلاسما	Melt-in plasma arc welding	جوشکاری پلاسما ذوبی
Computer Numerically Controlling (CNC)	کنترل عددی با کامپیوتر	Pulsed High Energy Density Plasma (PHEDP)	پلاسما پالسی پرانرژی
Laser triggered plasma	پلاسما فعال شده با لیزر	Plasma flushing efficiency	کارایی فشار پلاسما
		On-time pulse	پالس به موقع

مراجع

- [1] Hinds, B.K. and S.M. De Almeida, *Plasma arc heating for hot machining*. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1981. **21**(2): p. 143-152.
- [2] Feng, W., H. Zhou, and S.-z. Yang, *Nano-indentation and wear-resistance behaviors of TiCN films by pulsed plasma on cemented carbide cutting tool*. Materials Science and Engineering: A, 2010. **527**(18-19): p. 4767-4770.
- [3] Mirahmadi, A., S. Saedodin, and Y. Shanjani, *Feasibility study of high frequency plasma aided rapid prototyping*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(5): p. 722-728.
- [4] Shabgard, M., et al., *Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013. **65**(0): p. 79-87.

- [5] Chang, G. and Y. Tu, *Closed-loop control in ultrafast laser milling process using laser triggered plasma*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012. **60**(0): p. 35-39.
- [6] Tani, G., et al., *Evaluation of molten pool geometry with induced plasma plume absorption in laser-material interaction zone*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(6): p. 971-977.
- [7] Wu, C.S., et al., *Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling*. Journal of Manufacturing Processes, 2014. **16**(1): p. 74-85.
- [8] Salonitis, K. and S. Vatosianos, *Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process*. Procedia CIRP, 2012. **3**(0): p. 287-292.
- [9] Dewangan, S., S. Gangopadhyay, and C.K. Biswas, *Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis*. Measurement, 2015. **63**(0): p. 364-376.
- [10] Dubey, A.K. and V. Yadava, *Laser beam machining—A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008. **48**(6): p. 609-628.