علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، پاییز و زمستان ۹۴، صفحه ۱۲-۱

تعیین شرایط بهینه جوشکاری پرتوهای پرانرژی برای دست یابی به خواص مغناطیسی و مکانیکی مطلوب به صورت هم زمان

حسین مستعان[۱] ، مرتضی شمعانیان[۲] ، مهدی صفری[۳]

۱- دانشکده فنی مهندسی ، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، ایران

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان ، ایران

۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، ایران

پست الکترونیکی: h-mostaan@araku.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۱ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۱۲)

چکیده

آلیاژهای مغناطیسی FeCo-V به علت خواص مغناطیسی و مکانیکی عالی، از مهمترین آلیاژهای مغناطیسی مورد استفاده در موتورهای دوار با سرعت چرخش بالا محسوب می شوند. جوشکاری این دسته از آلیاژها با چالش بزرگی روبرو است چرا که در اثر حرارت ناشی از جوشکاری استحاله های فازی مختلف به شدت خواص مکانیکی و مغناطیسی اتصالات را تحت تأثیر قرار می دهد. در این پژوهش فویل های FeCo-V به وسیله فرایندهای جوشکاری توسط پرتوهای لیزر و الکترونی به یکدیگر جوش داده شد. در ادامه، پس از توسعه روابط ریاضی بر اساس روش رویه پاسخ محدوده تغییرات پارامترهای هر دو فرایند به گونه ای مشخص گردید که هر یک از اتصالات دارای بیشینه انرژی تولیدی ممکن بوده و در عین حال از استحکام مکانیکی مطلوبی برخوردار باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژهای FeCo-V، جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی، خواص مغناطیسی، خواص مکانیکی، بهینه سازی.

Determination of Optimized High Energy Beams Welding Conditions in Order to Simultaneous Obtaining of Desirable Magnetic and Mechanical Properties

H. Mostaan[1], M. Shamanian[2], M.Safari[3]

1- Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Arak University, Arak, Iran(Corresponding author).

2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

(Received 12 August 2015 ; Accepted 3 November 2015)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Abstract
FeCo-V alloys are one of the most important groups of magnetic material which currently used in high speed engines due to their excellent magnetic and mechanical properties. Welding of these alloys is a great challenge since various phase transformation result in significant changes in magnetic and mechanical properties. In this research ultra-thin FeCo-V magnetic foils were welded using laser and electron beam welding processes. After development of mathematical models, working limits of process parameters were chosen to obtain welded joints which have simultaneously appropriate maximum energy product and mechanical strength.

Keywords: FeCo-V alloys, High energy beams welding, Magnetic properties, Mechanical properties, Optimization.

۱- مقدمه

آلیاژهای بر پایه FeCo از جذابیت زیادی برخودار بوده چرا که دارای بیشترین مغناطش اشباع هستند و دمای کوری بالایی دارند [۱,۲]. علی رغم مشخصه های منحصر به فرد آنها، استفاده از آنها به علت قیمت زیاد [۳]، کارپذیری ضعیف برای تولید ورق های فوق نازک[۴,۵] و مقاومت الکتریکی ذاتی پایین [۲] با محدودیت هایی روبرو هستند. افزودن وانادیوم به این آلیاژها انعطاف پذیری در دمای محیط این آلیاژها را تقویت کرده و آلیاژهای FeCo-V را می توان تا بیش از ۹۰٪ کاهش ضخامت در دمای محیط نورد نمود و لذا می توان فویل هایی با ضخامت تنها ۵۰ میکرومتر با خواص مغناطیسی اشاره شده به دست آورد. آلیاژهای FeCo که حاوی ۵ تا ۱۳ ٪ وانادیوم هستندبه گروهی از مغناطیس های سخت و نیمه سخت متعلق هستند. بسته به مقدار وانادیوم، میدان وادارندگی (Hc) این آلیاژها از ۴ تا ۲۴ کیلوآمپر بر متر و مغناطیس القایی باقیمانده بین ۱/۲۵ تا ۰/۶ تسلا تغییر می کند [۶]. به علاوه، پایداری خواص مغناطیسی این آلیاژها در دمای بالا سبب شده تا این آلیاژها انتخاب منحصر به فردی برای تولید قطعات متحرک روتورهای سینکروترون، سنسورهای گشتاور و استاتورهای موتورهای دوار با سرعت چرخش بسیار زیاد باشند [۶,۷]. آلیاژهای FeCo-V بسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ و عملیات حرارتی انجام شده بر روی آنها می توانند دارای ساختار fcc (فاز γ) و یا ساختار bcc (فاز α) باشند. به علاوه، این آلیاژها را می توان توسط رسوب گذاری ذرات غنی از وانادیوم (Co_3V) از نظر مغناطیسی سخت نمود [۸–۱۲]. برای آنکه این آلیاژها بتوانند به عنوان روتور مورد استفاده در موتورهای با سرعت چرخش بسیار زیاد به خوبی عمل کنند و بیشترین بازدهی موتور را رقم بزنند، بایستی دارای میدان وادارندگی بالا، مغناطیس القایی باقیمانده زیاد و در نتیجه انرژی تولیدی بیشینه زیاد (max(BH)) باشند. بیشینه انرژی تولیدی در واقع بیان گر مقدار انرژی مفید در دسترس می باشد [۱۳]. همچنین بایستی توجه شود که میدان وادارندگی بیشتر وابسته به متغیرهای ریزساختاری می باشد تا ترکیب شیمیایی آلیاژ [۱۴]. از سوی دیگر، همان طور که در بالا نیز اشاره شد، استحاله های فازی مختلف نظیر استحاله آلوتروپیک و رسوب گذاری در حین یک سیکل حرارتی می توانند رخ دهند. این استحاله های فازی می توانند به طور قابل توجهی مشخصه های ریزساختاری آلیاژهای FeCo-V را تحت تأثیر قرار دهند. با توجه به این توضیحات، جوشکاری این دسته از آلیاژها یک چالش بزرگ محسوب می شود زیرا جوشکاری این آلیاژها خواص مکانیکی و مغناطیسی آلیاژها را می تواند در اثر وقوع استحاله های فازی به شدت تضعیف نماید. بنابراین انتخاب یک فرایند جوشکاری مناسب و همچنین کنترل پارامترهای فرایند جوشکاری با هدف به حداقل رساندن اثرات مخرب جوشکاری بر خواص مغناطیسی و مکانیکی نمونه های جوشکاری شده از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

روش های جوشکاری مقاومتی متداول و روش های جوشکاری قوس الکترود تنگستن برای اتصال قطعات کوچک،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

نازک و مینیاتوری مناسب نیستند زیرا این فرایندهای جوشکاری ذوب بیش از حد و ناحیه متأثر از حرارت نامطلوب را در پی دارد. برخی از روش های جوشکاری مانند میکروپلاسما، جوشکاری توسط پرتو لیزر و جوشکاری توسط پرتو الکترونی می توانند برای اتصال فویل های بسیار نازک مورد استفاده قرار گیرند. در این میان جوشکاری توسط پرتوهای لیزر و الکترونی از مزایای منحصر به فردی نظیر کنترل دقیق انرژی منتقل شده به فلز پایه، تکرارپذیری و انعطاف پذیری فرایند، اعوجاج حرارتی ناچیز، ناحیه متأثر از حرارت ناچیز، سرعت جوشکاری بسیار زیاد و توانایی ایجاد اتصالاتی با استحکام مکانیکی مناسب برخوردار هستند و به طور گسترده در صنایع خودروسازی، هوافضا، انرژی، الکترونیک و ابزارها و تجهیزات پزشکی مورد استفاده قرار می گیرند [۱۵–۲۳]. تشکیل مهره جوش و کیفیت آن در فرایندهای جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی وابسته به ترکیبی از پارامترهای مختلف فرایند می باشد. این متغیرها شامل سرعت جوشکاری، توان پرتو، عمق فوکوس، فرکانس و دوره ضربان می باشد. لذا بهره گیری کامل از مزایای این فرایندهای پیشرفته بدون انتخاب صحیح مقادیر پارامترهایی که تأثیر زیادی بر توزیع دمایی قطعات جوشکاری شده دارند، میسر نمی باشد [۲۴,۲۵].

برای کاهش آزمایشات و صرفه جویی در وقت و هزینه نیاز است که پارامترهای فرایند بر پایه مدل سازی فرایند پیش بینی و بهینه سازی شوند. روش های مختلفی برای دست یابی به متغیرهای خروجی مطلوب از طریق توسعه مدل های ریاضی وجود دارد. از میان روش های مختلف، روش رویه پاسخ یکی از بهترین روش های مدل سازی و بهینه سازی متغیرها می باشد [۲۶]. همچنین لازم به ذکر است که آلیاژهای مغناطیسی FeCo-V رفتارهای پیچیده ای از خود نشان می دهند، بدین معنا که در گستره دماهایی که خواص مکانیکی بهینه می باشد، خواص مغناطیسی از حالت بهینه فاصله می گیرد. لذا بایستی که از مکانیزم و روند تأثیرگذاری پارامترهای فرایندهای جوشکاری توسط پرتو لیزر و پرتو الکترونی بر خواص مغناطیسی و مکانیکی آلیاژ FeCo-V شناخت کافی حاصل شده و شرایط به گونه ای مهیا شود که خواص مکانیکی و مغناطیسی اتصالات به طور هم زمان در بهترین حالت خود قرار گیرند.در راستای مطالعات صورت گرفته در این زمینه، نویسندگان این مقاله مکانیزم تغییرات خواص مکانیکی، تحولات ریزساختاری و تغییرات خواص مغناطیسی را در اثر جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی به طور گسترده مورد مطالعه قرار داده اند [۲۷–۲۹]. مطالعات در این زمینه نشان داده است که علل اصلی تغییرات خواص مغناطیسی، ظهور مؤلفه های جدید بافت در ناحیه جوشکاری شده آلیاژ Fe-Co-V و تغییرات ریزساختاری در آن می باشد [۲۸]. به علاوه، مشخص گردیده است که تحولات فازی شامل استحاله منظم شدن عامل اصلی تضعیف خواص مکانیکی در مناطق جوش و متأثر از حرارت می باشد [۲۷].

از آنجا که در منابع مختلف گزارشی در رابطه با این نوع خاص از اتصال فویل های مغناطیسی FeCo-Vمبنی بر تعیین محدوده پارامترهای بهینه فرایند جوشکاری توسط پرتوهای پر انرژی وجود ندارد، هدف اصلی از این پژوهش بررسی مکانیزم های تغییرات خواص مکانیکی و مغناطیسی فویل های FeCo-V و بهینه سازی پارامترهای فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر و پرتو الکترونی به صورت هم زمان می باشد، که در این راستا پارامترهای دو فرایند به گونه ای انتخاب می شوند که خواص مکانیکی و مغناطیسی فویل های جوشکاری شده به طور همزمان در بیشینه مقدار خود قرار داشته باشند.

مواد و روش انجام آزمایش

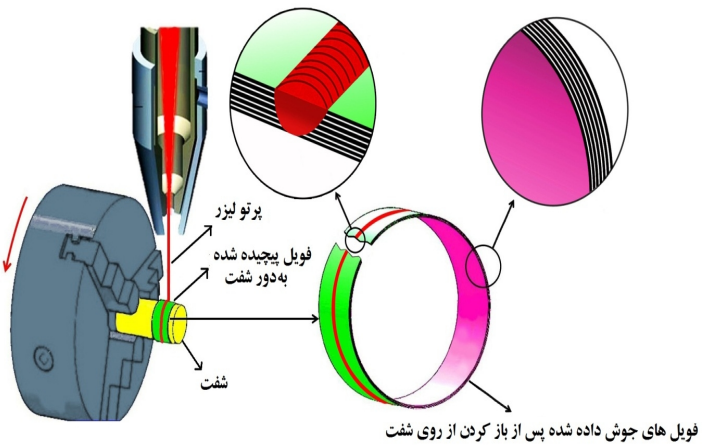
فلز پایه مورد مطالعه در این پژوهش عبارت است از فویل های مغناطیسی با ضخامت ۰/۰۵ میلیمتر و عرض ۲۵ میلیمتر از آلیاژ FeCo-V که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جدول(۱) ارائه شده است.

در این پژوهش از روش های جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی شامل فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر ضربانی Nd:YAG و فرایند جوشکاری توسط پرتو الکترونی بهره گرفته شد.

تجهیزات مربوط به فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر شامل یک دستگاه لیزر ضربانی Nd:YAG (IQL20) ساخت مرکز

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

تحقیقات لیزر پایاپرتو می باشد. بیشینه توان میانگین تولیدی توسط این دستگاه ۸۰۰ وات بوده و قادر به تولید پرتوی می باشد که بیشینه انرژی هر ضربان آن برابر با ۷۰ ژول خواهد بود. با توجه به حساسیت آلیاژ مورد مطالعه و برای جلوگیری از ورود رطوبت موجود در هوا و دیگر آلودگی هایی که می توانند منجر به تشکیل تخلخل و ریزترک ها شوند و همچنین به منظور جلوگیری از تشکیل پلاسما در اثر برخورد پرتو پرانرژی لیزر با مولکول های هوا و یونیزه شدن آنها، در حین جوشکاری از دمش گاز آرگون با خلوص بسیار بالا با نرخ ۱۵ لیتر بر دقیقه بهره گرفته شد. علاوه بر آن، به منظور پایش دقیق فرایند جوشکاری، یک دوربین CCD[1] در قسمت بالای سکوی جوشکاری تعبیه شد. تنظیمات دستگاه به گونه ای انجام شد تا پرتو لیزر ساطع شده از دستگاه در مد گاوسین[2] (TEM_{00}[3]) قرار داشته باشد. سایر متغیرهای فرایند که درحین انجام جوشکاری ثابت در نظر گرفته شده اند، در جدول(۲) نشان داده شده اند. شکل(۱) نیز نشان دهنده روند فرایند جوشکاری توسط پرتو پرانرژی به صورت شماتیک می باشد.



شکل ۱- شماتیک روند جوشکاری فویل های مغناطیسی

فویل های مغناطیسی با ابعاد ۰/۰۵×۲۵×۱۰۰۰ میلیمتر مکعب به دور یک شفت به قطر ۴۵/۵ میلیمتر و طول ۷۰/۵ میلیمتر پیچیده شده و از آنجا که فاصله هوایی بین لایه ها یک عامل مؤثر در کیفیت جوش می باشد، انتهای فویل های پیچیده شده به دور شفت توسط چسب مایع ثابت شد. با توجه به قطر شفت و طول فویل پیچیده شده به دور آن، تعداد ۷ لایه فویل به دور شفت پیچیده خواهد شد. در این حالت، فاصله هوایی بین لایه ها به حداقل رسیده و همچنین از به وجود آمدن اعوجاج در خط جوش جلوگیری می شود. سپس شفتی که فویل به دور آن پیچیده شده است توسط یک موتور دوار چرخانده شده و به صورت هم زمان پرتو لیزر به مرکز عرضی فویل تابانیده می شود. بدین ترتیب، بین لایه های فویل یک اتصال صورت می گیرد که با تغییر در مقادیر متغیرهای فرایند، تعداد لایه های متصل شده به هم تغییر می کند (حداقل ۲ لایه و حداکثر ۷ لایه). پس از اتمام فرایند جوشکاری، فویل های جوش داده شده توسط سنگ فرز از روی شفت باز شده و مطالعات ریزساختاری، بافت شناسی و مشخصه یابی های مغناطیسی و مکانیکی بر روی اتصال های ایجاد شده انجام شد.لازم به ذکر است این روش خاص اتصال، روشی است که به سهولت می توان از آن در تولید انبوه قطعات موتورهای با سرعت چرخش بسیار بالا بهره گرفت. از این رو، با توجه به لزوم در نظر گرفتن شرایط حاکم بر نوع جوشکاری این آلیاژ و تلاش برای نزدیک شدن به شرایط موجود در صنعت تولید موتورهای با سرعت چرخش بسیار بالا، روش مذکور جهت انجام پژوهش انتخاب شد.برای انجام فرایند جوشکاری توسط پرتو الکترونی در این پژوهش از یک دستگاه جوشکاری پرتوالکترونی ساخت شرکت Leybold-Heraeus بهره گرفته شد. بیشینه ولتاژ شتاب دهنده در این دستگاه ۶۰ کیلوولت می باشد. سایر متغیرهای فرایند در جدول(۳) آورده شده است. پرتو الکترون تولید شده توسط دستگاه قبل از انجام جوشکاری با تغییر در میزان جریان سیم پیچ های متمرکز کننده بر روی یک هدف متمرکز شده که در این حالت کوچک ترین، متمرکزترین و در نتیجه شدیدترین پرتو به دست خواهد آمد. سپس قطعه هدف توسط نمونه ها جایگزین شده و پس از ایجاد خلأ، جوشکاری آغاز می شود. روش مونتاژ فویل ها بر روی شفت ها در این روش نیز مانند فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر در نظر گرفته شد. پس از اتمام فرایند جوشکاری، فویل های جوش داده شده توسط سنگ فرز از روی شفت باز

1 Charge Coupled Device
2 Gaussian
3 Transvers ElectroMagnetic

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فویل های مغناطیسی استفاده شده در این پژوهش

ترکیب شمیایی (درصد وزنی)		خواص مکانیکی	
Co	پایه	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۲۲۸۷
Fe	۴۳/۲۵	استحکام کششی (مگاپاسکال)	۲۳۱۰
V	۷/۱۵	ازدیاد طول(%)	۱/۳
Mn	۰/۱۷	سختی (ویکرز)	۷۴۰

جدول ۲- مقادیر متغیرهای فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر

شکل ضربان	مستطیل
فاصله کانونی (میلیمتر)	۱۰۰
قطر پرتو متمرکز شده (میلیمتر)	۰/۱۸
فرکانس ضربان (هرتز)	۴۰
طول موج پرتو (نانومتر)	۱۰۶۴

شده و مطالعات بر روی اتصالات ایجاد شده انجام شد.

با توجه به فوق ریزدانه بودن فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش، جهت مشاهده ریزساختار و تعیین اندازه دانه آن، از یک دستگاه SEM مجهز به تفنگ نشر میدانی ساخت شرکت Tescan بهره گرفته شد.

به منظور تعیین استحکام اتصالات ایجاد شده توسط پرتوهای پرانرژی از آزمون کشش تک محوره استفاده شد. نمونه های آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 به صورت عرضی از فویل های جوشکاری شده توسط دستگاه وایرکات استخراج شدند. آزمون کشش نیز با آهنگ کرنش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه توسط دستگاه کشش ساخت شرکت Gotech تایوان مدل TCS-2000 انجام شد. به منظور تعیین منحنی های پسماند مغناطیسی (حلقه های پسماند مغناطیس بر حسب میدان اعمالی)نمونه های جوشکاری شده و فلز پایه از دستگاه مغناطومتر نمونه ارتعاشی (VSM[1]) ساخت شرکت مغناطیس کویر کاشان واقع در مرکز رشد و کارآفرینی دانشگاه کاشان بهره گرفته شد. به منظور تحلیل داده های حاصل از آزمایش نیز، اعم از به دست آوردن رابطه های ریاضی میان متغیرهای فرایندهای جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی و بهینه سازی متغیرها، از نرم افزارMinitab® V.16.2.4 استفاده شد.

نتایج و بحث

با انجام آنالیز VSM بر روی فلز پایه و نمونه های جوشکاری شده توسط پرتوهای پرانرژی، ملاحظه می شود که تغییرات زیادی در خواص مغناطیسی فویل های مغناطیسی FeCo-V به وجود می آید.خاصیت مغناطیسی مهمی که به عنوان معیار طراحی آلیاژهای مغناطیسی سخت و نیمه سخت برای موتورهای دوار مطرح می شود و در اثر جوشکاری آلیاژ FeCo-V دستخوش تغییرات زیادی می شود، انرژی تولیدی و یا همان $(BH)_{max}$ می باشد.

مقدار $(BH)_{max}$ نیز بیان گر مقدار انرژی مؤثری است که توسط قطعه مغناطیسی تولید می شود و مهم ترین معیار جهت مقایسه کارایی مواد مغناطیسی مختلف در کاربردهای مذکور می باشد. مقدار $(BH)_{max}$ برای یک قطعه مغناطیسی توسط قسمتی از منحنی پسماند (B-H) که در ربع دوم واقع شده است، تعیین می شود. این قسمت از منحنی، از نقطه متناظر با میدان القایی باقیمانده (Br) شروع شده و تا نقطه متناظر با میدان وادارندگی (Hc) ادامه دارد.بزرگ ترین مستطیلی که بتوان در این ناحیه به دست آورد،

1 Vibrating Sample Magnetometer

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۳- مقادیر متغیرهای فرایند جوشکاری توسط پرتو الکترونی

الگوی اسکن توسط پرتو	حلقوی
فاصله کاری (میلیمتر)	۲۰۰
فرکانس تابش پرتو الکترونی (هرتز)	۱۰۰۰
فشار محفظه جوشکاری (میلی‌بار)	$۰/۵\times۱۰^{-۴}$

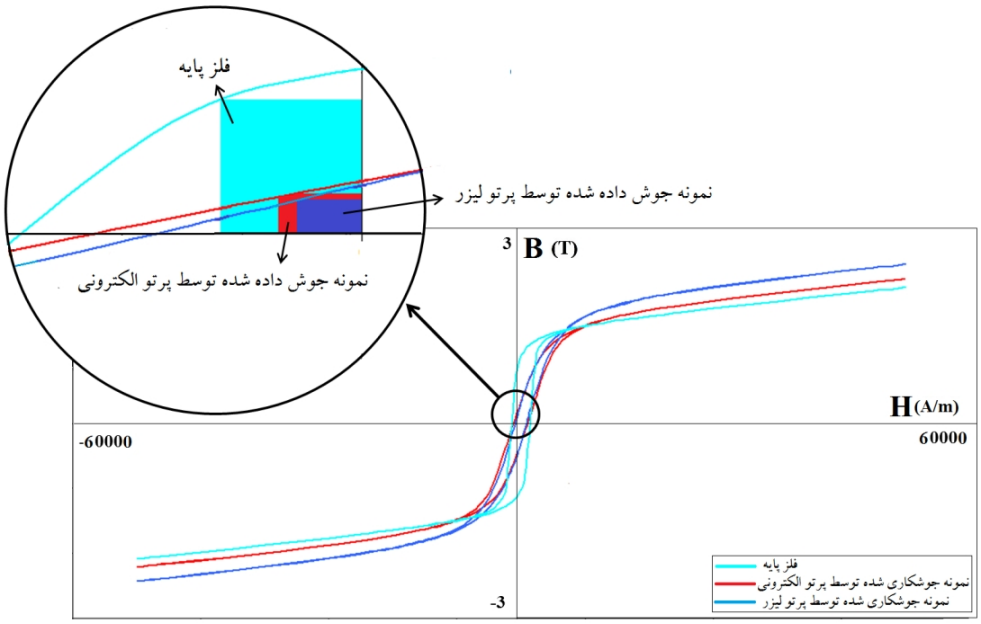
بیان گر مقدار $(BH)_{max}$ می باشد. لذا، برای دست یابی به بیشینه مقدار $(BH)_{max}$ می بایستی مقادیر مربوط به Br و Hc تا حد امکان بالا باشد. با دقت در حلقه های پسماند نشان داده شده در شکل(۲) ملاحظه می شود که منطقه محصور شده توسط منحنی در ربع دوم برای نمونه های جوشکاری شده به شدت کاهش پیدا کرده است. مساحت مستطیل های نشان داده شده در این ناحیه برای فلز پایه و دو نمونه جوشکاری شده بیان گر کاهش شدید مقدار $(BH)_{max}$ در نمونه های جوشکاری شده می باشد.

مقادیر $(BH)_{max}$ به همراه مقادیر Hc و Br متناظر در جدول ۴ آورده شده است. ملاحظه می شود که مقدار $(BH)_{max}$ از ۴/۳۳ کیلوژول بر مترمکعب برای فلز پایه به ۰/۲۶۵ و ۰/۱۶۰ به ترتیب برای نمونه های جوشکای شده توسط پرتو الکترونی و لیزر کاهش پیدا کرده است. این مقدار کاهش در $(BH)_{max}$ بسیار قابل توجه بوده که منجر به کاهش شدید کارآیی و بازده آلیاژFeCo-V به عنوان یک ماده مغناطیسی نیمه سخت می شود. با توجه به این نکته که مقدار $(BH)_{max}$ از ربع دوم منحنی پسماند به دست می آید و این ناحیه از نقاط متناظر با Br تا Hc امتداد یافته است، لذا می بایستی سازوکار کاهش مقدار $(BH)_{max}$ را در سازوکار ها و علل کاهش در مقادیر Hc و Br جستجو نمود.

مهم ترین عاملی که بر فاکتور مغناطیسی Br اثرگذار است، جهت گیری دانه ها و یا همان بافت موجود در آلیاژ می باشد. این اثرگذاری به گونه ای است که اگر جهت گیری دانه ها هم راستا با جهت سخت مغناطیسی باشند، در این صورت مقدار Br بالا می باشد. در واقع، در این شرایط مغناطیس القایی در ماده به علت سخت تر شدن چرخش دوقطبی های مغناطیسی، افزایش می یابد. از سوی دیگر، در صورت حاکم بودن شرایطی در آلیاژ که منجر به تقویت جهت گیری دانه ها به موازات جهات آسان و یا متوسط مغناطیسی شود، کاهش مقدار Br را به همراه دارد.در مطالعات قبلی انجام شده توسط نویسندگان مشخص شده است که بافت حاکم در فلز پایه عبارت است از فیبر α در مقطع $\phi۲=۴۵^{\circ}$ از توابع توزیع جهت و مؤلفه های مکعبی و مکعبی دوران یافته در مقاطع ۰° و ۴۵°. فیبر γ با شدت بسیار کم[۲۸,۲۹]. فیبر α در واقع دربردارنده مجموعه جهت گیری های <۰۱۱> موازی با جهت نورد می باشد. مولفه های مکعبی و مکعبی دوران یافته نیز به ترتیب نشان دهنده بافت های <۰۱۰>(۰۰۱) و <۱۱۰>(۰۰۱) می باشند. مطابق با نتایج گزارش شده، برای آلیاژهای FeCo-V که حاوی بیش از ۴۱ درصد کبالت باشد، جهات مغناطیسی سخت، متوسط و آسان به ترتیب <۰۰۱>، <۰۱۱> و <۱۱۱> خواهد بود [۳۰,۳۱]. این بدان معناست که مغناطیزه شدن و چرخش دوقطبی های مغناطیسی در جهات <۰۰۱> و <۱۱۱> به ترتیب بیشترین و کمترین شدت میدان مغناطیسی را نیاز دارد. با توجه به حضور فیبر α و مؤلفه های مکعبی و مکعبی دوران یافته در فلز پایه، جهت گیری غالب دانه ها در این آلیاژ در جهت سخت و یا متوسط مغناطیسی بوده و دوقطبی های مغناطیسی هم راستایی خود را در غیاب میدان مغناطیسی (H=0) حفظ کرده و بنابراین مقدار Br بالا خواهد بود.

در مطالعات گذشته مشخص شدکه با انجام جوشکاری بر روی فویل های مغناطیسی FeCo-V، بافت غالب در منطقه جوش تغییر کرده و جهت گیری دانه ها کاملا متفاوت خواهد شد. بدین ترتیب که مؤلفه های مکعبی و مکعبی دوران یافته به طور کامل حذف شده، فیبر α تا حد زیادی تضعیف شده و در ازای

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل ۲- حلقه های هیسترزیس مربوط به فلز پایه و نمونه های جوشکاری شده توسط پرتوهای پرانرژی

جدول ۴- مقادیر خواص مغناطیسی مربوط به فلز پایه و فلز جوش نمونه های جوشکاری شده توسط پرتوهای پرانرژی

خاصیت مغناطیسی	فلز پایه	نمونه جوش داده شده با پرتو الکترونی	نمونه جوش داده شده با پرتو لیزر
B_S (Tesla)	۱/۴۹	۱/۵	۱/۶۶
$(BH)_{max}$ (kJ/m^3)	۴/۳۳	۰/۲۶۵	۰/۱۶۰
B_r (Tesla)	۱/۰۴۳	۰/۱۸۷	۰/۱۵۲
H_c (A/m)	۱۱۹۴۰	۵۸۹۸/۳۶	۴۹۰۰/۹۷

آن فیبر γ به شدت تقویت شده است. فیبر γ در واقع نشان دهنده جهت گیری های <۱۱۱> موازی با جهت عمود بر صفحه می باشد. بنابراین حضور فیبر γ در آلیاژهای مغناطیسی سخت و نیمه سخت بسیار مضر بوده چرا که دربردارنده جهات آسان تر مغناطیسی می باشد و باعث کاهش مقدار Br می شود. بنابراین می توان این گونه اظهار داشت که کاهش مقدار Br در منطقه جوش متأثر از دو عامل زیر است:

- شدت یافتن فیبر γ در منطقه جوش که هم راستایی دانه ها با جهات آسان تر مغناطیسی را در پی دارد.
- حذف مؤلفه های مکعبی و مکعبی دوران یافته و تضعیف فیبر α در فلز جوش.

در شکل(۳) تصاویری از ریزساختار مربوط به فلز پایه و مرکز فلز جوش دو نمونه جوش داده شده توسط پرتو لیزر و پرتو الکترونی نشان داده شده است. با مقایسه این تصاویر مشاهده می شود که اندازه دانه ها در فلز جوش نسبت به فلز پایه بیشتر شده و از حدود ۳۰۰ نانومتر در فلز پایه به حدود ۲ میکرومتر در فلز جوش افزایش پیدا کرده است. رشد دانه ها در اثر جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی، مهمترین عاملی است که منجر به کاهش میدان وادارندگی و در نتیجه کاهش انرژی تولیدی توسط مغناطیسی نیمه سخت FeCo-V می شود. در یک ساختار درشت دانه، چگالی مرزدانه ها نسبت به ساختار ریزدانه کمتر بوده و لذا دیواره حوزه های مغناطیسی از آزادی حرکت بیشتری برخوردار می باشند. بدین ترتیب مقدار Hc در یک ساختار درشت دانه نسبت به ساختار ریزدانه کمتر است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

نتایج آزمون کشش نیز حاکی از آن است که هر دو نمونه های جوشکاری شده توسط پرتو لیزر و پرتو الکترونی از منطقه جوش دچار شکست می شوند. شکل(۴) را ببینید. همچنین در مطالعات گذشته مشخص شده است که سختی در منطقه جوش منطقه متأثر از حرارت نسبت به فلز پایه به شدت کاهش پیدا کرده است. علل کاهش سختی در این مناطق و در نتیجه وقوع شکست اتصالات از این مناطق به تفصیل در مقالات منتشر یافته توسط نویسندگان تشریح شده است [۲۷]. علت اصلی شکست از ناحیه جوش به ایجاد ساختار نامنظم در این منطقه و کاهش سختی آن نسبت به ساختار منظم می باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص می شود که هم خواص مغناطیسی و هم خواص مکانیکی اتصالات ایجاد شده توسط پرتوهای پرانرژی با کاهش شدیدی روبرو است. در مطالعات جداگانه ای، بر پایه روش های آماری، تأثیر هر یک از پارامترهای مربوط به جوشکاری توسط پرتو لیزر و پرتو الکترونی مشخص شده است و بر این اساس، روابط ریاضی که بیان گر ارتباط بین مقادیر انرژی تولیدی و استحکام شکست اتصالات می باشد، استخراج شده است.

پارامترهای مورد بررسی در فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر شامل دوره ضربان (Tp)، سرعت جوشکاری (S)، جریان لامپ (I) و عمق فوکوس (F) می باشد. پارامترهای جریان پرتو (I)، ولتاژ شتاب دهنده (V)، سرعت جوشکاری (S) و عمق فوکوس (F) پارامترهایی هستند که در جوشکاری توسط پرتو الکترونی مورد بررسی قرار گرفته اند.روابط ریاضی مستخرج که به ترتیب بیان گر ارتباط بین پارامترهای فرایند جوشکاری لیزری و مقادیر انرژی تولیدی و استحکام شکست اتصالات هستند، عبارتند از[۲۷,۲۹]:

$$(BH)_{max} = 0.398 - 0.222I - 0.486T_p + 0.15S - 0.103F + 0.044 \times I^2 + 0.39 \times T_p^2 + 0.058F^2 + 0.25I \times T_p + 0.056T_p \times F - 0.098S \times F \quad (۱)$$

$$\sigma_{f,LBW} = 999.429 - 68.833T_p + 74.167S - 459.679I^2 - 275.679T_p^2 - 352.179S^2 - 119I \times S + 229I \times F + 184T_p \times S \quad (۲)$$

همچنین، روابط ریاضی مربوط به ارتباط بین پارامترهای فرایند جوشکاری پرتو الکترونی و مقادیر انرژی تولیدی و استحکام شکست اتصالات هستند، عبارتند از[۲۸]:

$$(BH)_{max} = 5.96286 - 1.76858I - 1.31917V + 1.87375S - 0.635F + 0.36116I^2 + 0.36516S^2 + 0.6051I \times V - 0.44875V \times S \quad (۳)$$

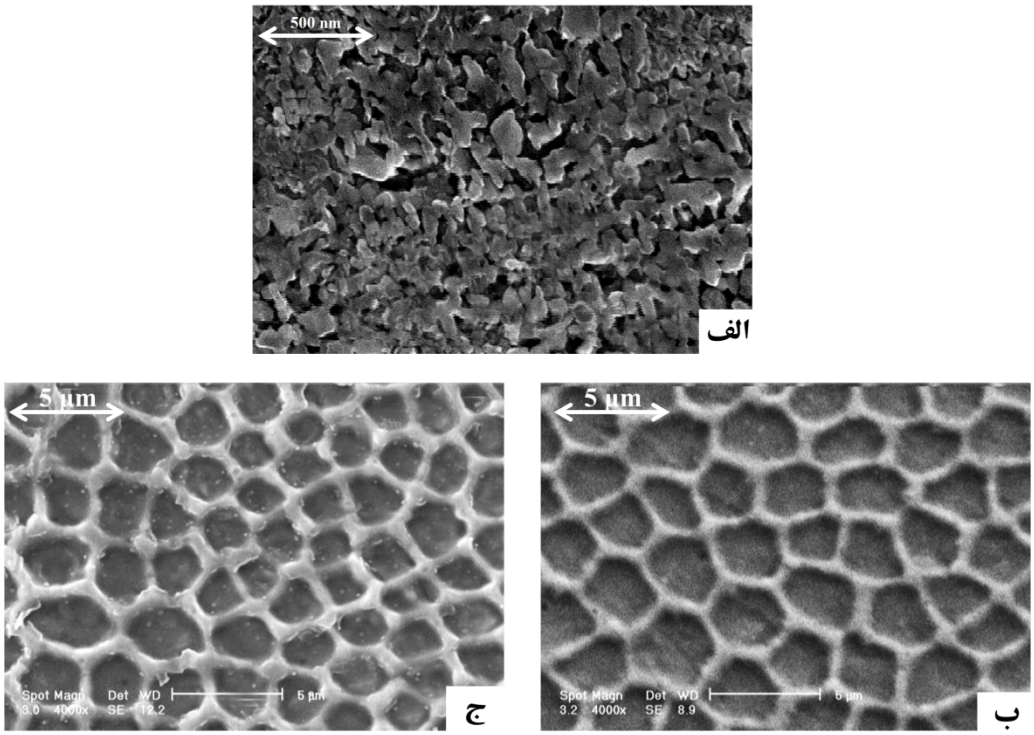
$$\sigma_{f,EBW} = 1153.14 + 21.29I + 44.87V - 67.12S - 23.23V^2 + 11.64S^2 - 22.31I \times F - 16.06V \times S \quad (۴)$$

با دقت در روابط فوق می توان دریافت که در هر دو فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر و پرتو الکترونی، پارامترهای مختلف تأثیرات متفاوتی بر خواص مغناطیسی و مکانیکی می گذارند. همچنین همان گونه که مشاهده می شود، در فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر، دو پارامتر سرعت جوشکاری و دوره ضربان نسبت به سایر پارامترها تأثیر شدیدتری بر انرژی تولیدی $(BH)_{max}$ و استحکام شکست اتصالات دارند.

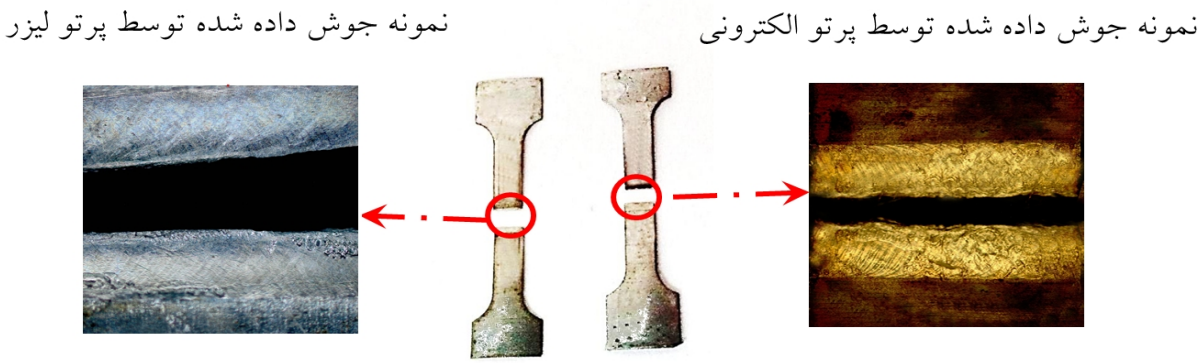
در مورد فرایند جوشکاری توسط پرتو الکترونی نیز سه پارامتر جریان پرتو، ولتاژ شتاب دهنده و سرعت جوشکاری از اهیمت بیشتری برخوردارند.پس از بهینه سازی متغیرهای فرایند جوشکاری توسط پرتوهای پرانرژی و به دست آوردن روابط ریاضی که بیان گر ارتباط میان متغیرهای فرایند و مقادیر $(BH)_{max}$ و استحکام شکست اتصالات ایجاد شده بر روی فویل های FeCo-V می باشد، بایستی با تحلیل نتایج به دست آمده در هر قسمت، متغیرها را به گونه ای بهینه کرد که در آن شرایط بتوان به طور هم زمان به بیشینه مقادیر $(BH)_{max}$ و استحکام شکست اتصالات دست یافت.

این موضوع از اهمیت زیادی برخوردار است، چرا که همان طور که عنوان شد، روند تأثیرگذاری متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی و مغناطیسی متفاوت است. بدین معنا که یک متغیر فرایند رابطه مستقیم با یک خروجی آزمایش دارد و با دیگری ارتباط معکوس دارد. به طور مثال در مورد فرایند جوشکاری توسط پرتو الکترونی، مشاهده شد که با افزایش سرعت جوشکاری مقدار (BH)max افزایش می یابد ولی استحکام شکست اتصالات با کاهش روبرو می شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل ۳- تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از الف) فلز پایه و ب) نمونه های جوشکاری شده توسط پرتو لیزر ج) نمونه های جوشکاری شده توسط پرتو الکترونی

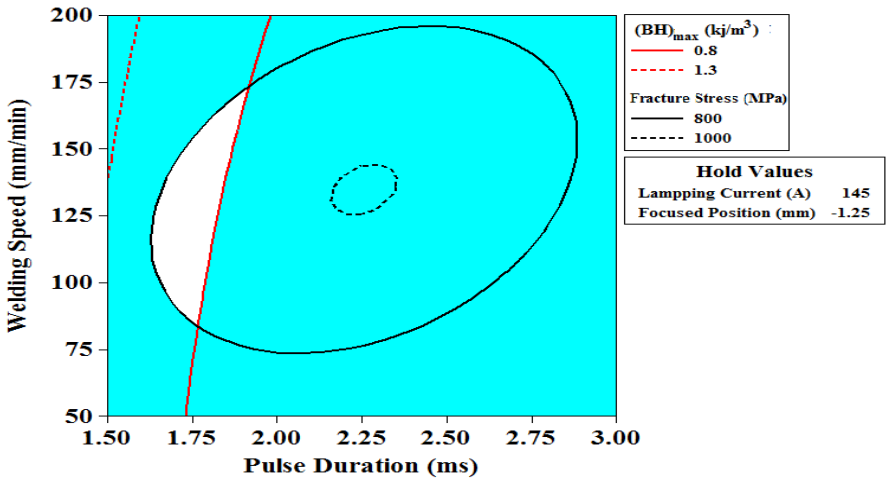


شکل ۴- تصاویر نمونه های آزمون کشش مربوط به نمونه های جوش داده شده توسط پرتوهای پرانرژی

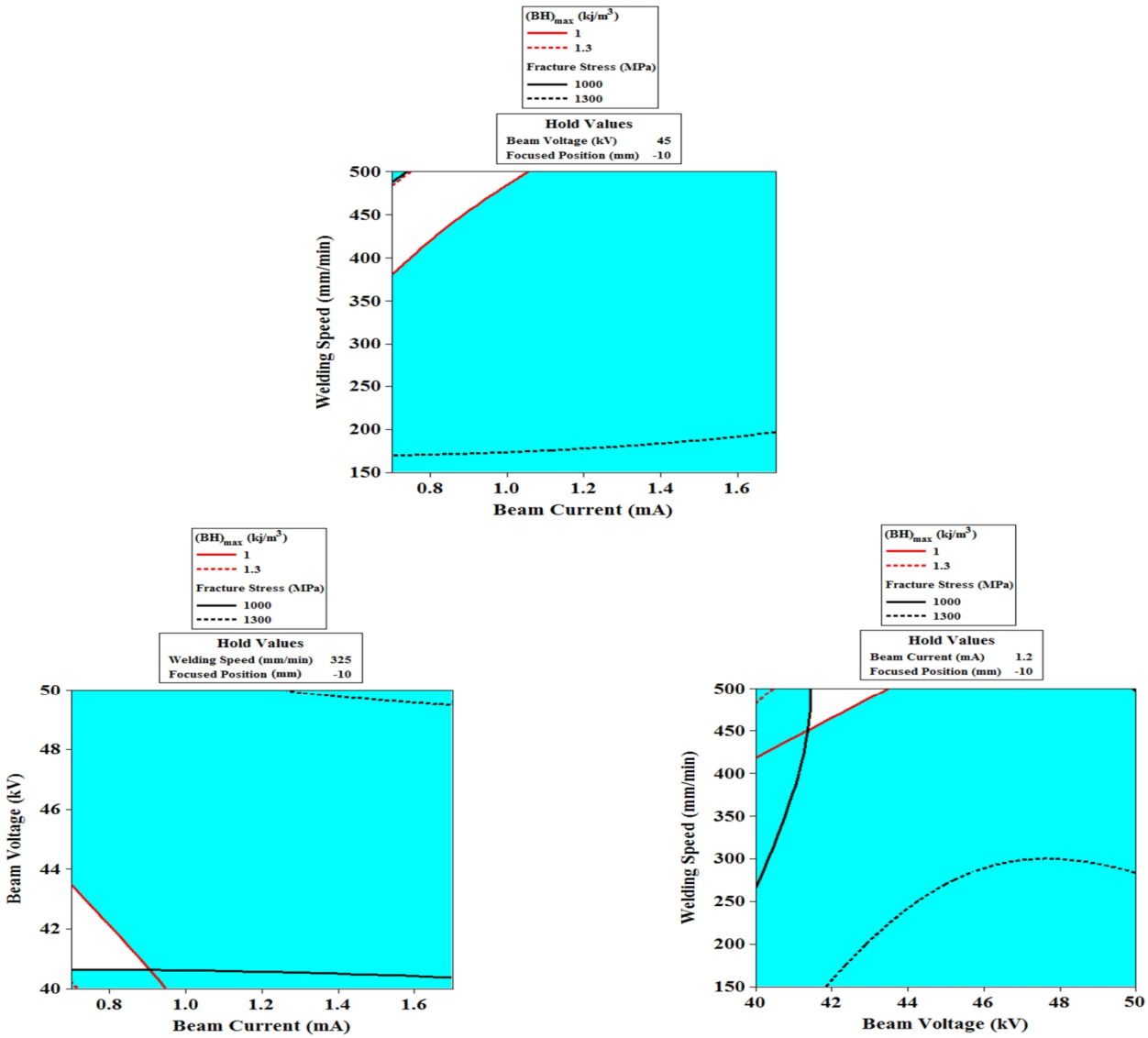
با دست یابی به خواص مغناطیسی و مکانیکی بیشینه به صورت هم زمان شرایطی مهیا می شود که در آن کارایی موتورهای دوار با سرعت چرخش بالا تا حد زیادی افزایش می یابد. به عبارت دیگر، موتور دوار هم می تواند به سرعت های زیاد دست پیدا کند و هم احتمال شکست اتصالات فویل ها، که وظیفه تأمین نیروی محرکه را بر عهده دارند، در اثر نیروهای گریز از مرکز تا حد زیادی کاهش می یابد.

بدین منظور، حداقل انرژی تولیدی برای فویل های جوشکاری شده توسط پرتوهای پرانرژی برابر با ۰/۸ کیلوژول بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. بدین معنا که فویل های جوشکاری شده که دارای انرژی تولیدی کمتر از این مقدار هستند، کارایی لازم را ندارند چرا که منجر به کاهش شدید راندمان موتورهای دوار می گردند. حداقل استحکام شکست نیز با توجه به سرعت چرخش موتور دوار که برابر با ۶۴۰۰۰ دور در دقیقه می باشد، برابر با ۸۰۰ مگاپاسکال درنظر گرفته شد. اتصالات با استحکام شکستی کمتر از این مقدار توانایی تحمل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل ۵- منحنی هم ترازی برای تعیین محدوده مجاز متغیرهای فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر به منظور دست یافتن به بیشینه مقادیر $(BH)_{max}$ و استحکام شکست اتصالات به طور هم زمان



شکل ۶- منحنی هم ترازی برای تعیین محدوده مجاز متغیرهای فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر به منظور دست یافتن به بیشینه مقادیر $(BH)_{max}$ و استحکام شکست اتصالات به طور هم زمان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

نیروهای گریز از مرکز را نداشته و در سرعت های چرخش زیاد دچار شکست می شوند. در شکل (۵)منحنی هم ترازی مربوط به دو متغیر اصلی فرایند، یعنی دوره ضربان و سرعت جوشکاری آورده شده است. در این تصویر محدوده مجاز متغیرها که منجر به اتصالی با مقادیر max(BH) و استحکام شکست بیشینه می شود با رنگ سفید نشان داده شده است. این منحنی بیان گر اطلاعات مفیدی است که با استفاده از آن می توان فرایند جوشکاری را با دقت بیشتری انجام داد و بدین ترتیب بهره وری تولید را تا حد امکان افزایش داد. بر طبق شکل زیر مشخص می شود که محدوده مناسب برای جوشکاری فویل های مغناطیسی FeCo-V به گونه ای که بهترین خواص مغناطیسی و مکانیکی حاصل شود آن است که سرعت جوشکاری بین ۸۰ تا ۱۷۰ میلیمتر بر دقیقه تنظیم شده و دوره ضربان نیز بین ۱/۶ تا ۱/۹ میلی ثانیه در نظر گرفته شود.

در شکل(۶) سه منحنی هم ترازی مشاهده می شود که هر یک بیان گر محدوده تغییرات مجاز متغیرها برای رسیدن به بیشینه مقادیر $(BH)_{max}$ و استحکام شکست اتصالات می باشند. این نمودارها در واقع مربوط به تأثیر سه پارامتر اصلی فرایند، یعنی جریان پرتو، ولتاژ شتاب دهنده و سرعت جوشکاری می باشد. قسمت های سفید رنگ در این منحنی ها این محدوده را مشخص می نماید. به عبارت دیگر با انجام جوشکاری توسط پرتو الکترونی در محدوده سفید رنگ از منحنی های هم ترازی می توان به طور هم زمان خواص مغناطیسی و مکانیکی مطلوبی را در اتصالات ایجاد شده مشاهده نمود. همان طور که ملاحظه می شود، محدوده مجاز تغییرات بسیار کوچک بوده که این موضوع به علت تأثیرات متفاوت متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی و مغناطیسی اتصالات می باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، اتصال فویل های فوق نازک مغناطیسی از جنس آلیاژ FeCo-V توسط فرایندهای جوشکاری بوسیله پرتوهای پرانرژی (لیزر و الکترونی) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. تغییرات مربوط به خواص مغناطیسی توسط آنالیز مغناطومتری نمونه ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفت و برای ارزیابی رفتار مکانیکی اتصالات ایجاد شده از آزمون کشش تک محوره بهره گرفته شد. همچنین بر پایه مطالعات انجام شده در رابطه با مشخصه های مکانیکی و مغناطیسی اتصالات، متغیرهای هر دو فرایند جوشکاری توسط روش های آماری بهینه سازی شد. بر این اساس، اهم نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت اند از:

- امکان اتصال موفقیت آمیز فویل های فوق نازک FeCo-V توسط پرتو لیزر ضربانی Nd:YAG و پرتو الکترونی به طورنسبی وجود دارد.
- انجام آزمون VSM بیان گر آن است که جوشکاری فویل های FeCo-V توسط هر دو فرایند منجر به کاهش میدان القایی باقیمانده و میدان وادارندگی و در پی آن کاهش $(BH)_{max}$ می شود.
- همچنین مشاهده گردید که نمونه های جوشکاری شده توسط هر دو روش در حین آزمون کشش تک محوره از منطقه جوش دچار شکست می شوند.
- آنالیز داده های به دست آمده از آزمون های VSM و کشش بیان گر آن است که در فرایند جوشکاری توسط پرتو لیزر متغیرهای دوره ضربان و سرعت جوشکاری و در فرایند جوشکاری توسط پرتو الکترونی متغیرهای جریان پرتو، ولتاژ شتاب دهنده و سرعت جوشکاری تأثیرشدیدتری نسبت به سایر متغیرها دارند.
- بهینه سازی توسط روش های آماری نشان می دهد که با توجه به تأثیر متفاوت پارامترهای هر دو فرایند بر خواص مکانیکی و مغناطیسی، جوشکاری موفقیت آمیز فویل های مغناطیسی FeCo-V تنها در محدوده باریکی از پارامترها امکان پذیر است.

مراجع

1.Yu, R.H., Basu, S., Zhang, Y., Xiao, J.Q., "Magnetic domains and coercivity in FeCo soft magnetic alloys", Journal of Applied Physics, Vol. 85, pp. 6034–6036, 1999 .

2.Sundar, R.., Deevi, S.., "Effect of heat-treatment on the room temperature ductility of an ordered intermetallic Fe–Co–V alloy", Materials Science and Engineering: A, Vol. 369, pp. 164–169, 2004 .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

3.Sourmail, T., "Near equiatomic FeCo alloys: Constitution , mechanical and magnetic properties", Vol. 50, pp. 816–880, 2005 .

4.Dependence of the magnetic anisotropy on the composition in cold-rolled vicalloy magnet (Printed).pdf
5.Kawahara, K., "Structures and mechanical properties of an FeCo-2V alloy", Journal of Materials Science, Vol. 18, pp. 3427–3436, 1983 .

6.Zakharov, V.M., Libman, M.A., Estrin, E.I., "On the role of atomic ordering in the formation of a high-coercivity state in iron-cobalt-vanadium alloys", The Physics of Metals and Metallography, Vol. 113, pp. 43–47, 2012 .

7.Ahmad, Z., Haq, A., Husain, S.W., Abbas, T., "Magnetic properties of isotropic Fe – 28Cr – 15Co – 3 . 5Mo permanent magnets with additives", Vol. 321, pp. 54–59, 2002 .

8.Clegg, D.W., Buckley, R.A., "Order Transformation in Iron-Cobalt-Based Alloys", Materials Science and Technology, Vol. 7, pp. 48–54, 1973 .

9.Ustinovshikov, Y.Ã., Lomova, N., Shabanova, I., "High-temperature B2 ordering in Fe 50 Co 50 alloy", Vol. 69, pp. 1753–1757, 2008 .

10.Sundar, R.., Deevi, S.., "Influence of alloying elements on the mechanical properties of FeCo–V alloys", Intermetallics, Vol. 12, pp. 921–927, 2004 .

11.Pinnel, M., Mahajan, S., Bennett, J., "Influence of thermal treatments on the mechanical properties of an Fe-Co-V alloy (remendur)", Acta Metallurgica, Vol. 24, pp. 1095–1106, 1976 .

12.Couto, A.A., Ferreira, P.I., "Phase Transformations and Properties of F e - C o Alloys", J. Mater. Eng., Vol. 11, pp. 31–36, 1989 .

13.Laughton, M.A., Warne, D.J., Brundrett, G.W., Surman, P.L., Taylor, R.H., Electrical Engineer's Reference Book, Sixteenth, Elsevier Science, Great Britain, 2003 .

14.Callister, W.D., Fundamentals of Materials Science and Engineering, 5, Wiley & Sons Inc, USA, 2001 .

15.Liao, H., Chen, Z., "A study on fiber laser micro-spot welding of thin stainless steel using response surface methodology and simulated annealing approach", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, pp. 1015–1025, 2012 .

16.Katayama, S., Kawahito, Y., Mizutani, M., "Latest progress in performance and understanding of laser welding", Vol. 39, pp. 8–16, 2012 .

17.Zhou, Y., Microjoining and nanojoining, Woodhead Publishing, Cambridge, 2008 .

18.Li, Z., Fontana, G., "Autogenous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydraulic valves", Vol. 74, pp. 174–182, 1998 .

19.Chen, W., Molian, P., "Dual-beam laser welding of ultra-thin AA 5052-H19 aluminum", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 39, pp. 889–897, 2007 .

20.Padmanaban, G., Balasubramanian, V., "Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy", Optics & Laser Technology, Vol. 42, pp. 1253–1260, 2010 .

21.Ventrella, V.A., Berretta, J.R., de Rossi, W., "Micro Welding of Ni-based Alloy Monel 400 Thin Foil by Pulsed Nd:YAG laser", Physics Procedia, Vol. 12, pp. 347–354, 2011 .

22.Chan, C.W., Man, H.C., "Laser welding of thin foil nickel–titanium shape memory alloy", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 49, pp. 121–126, 2011 .

23.P'ng, D., Molian, P., "Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils", Materials Science and Engineering: A, Vol. 486, pp. 680–685,2008 .

24.Han, Q., Kim, D., Kim, D., Lee, H., Kim, N., "Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 1116–1122, 2012 .

25.Tzeng, Y., "Parametric analysis of the pulsed Nd: YAG laser seam-welding process", Journal of materials processing technology, Vol. 102, pp. 40–47, 2000 .

26.Montgomery, D.C., Design and Analysis of Experiments, 5th Edition, 2000 .

27.Mostaan, H., Shamanian, M., Monirvaghefi, S.M., Behjati, P., Hasani, S., Fathi Moghaddam, M., Amiri, M., Szpunar, J. a., "Analysis and characterization of microstructural evolutions, mechanical response and fracture mechanism of laser welded Fe–Co–V ultra-thin foils", Optics & Laser Technology, Vol. 68, pp. 211–219, 2015 .

28.Mostaan, H., Shamanian, M., Monirvaghefi, S.M., Behjati, P., Szpunar, J. a., Sherafati, J., "Electron beam assisted joining of nanograin-sized Fe–Co–V magnetic foils: Study and optimization of magnetic properties of weld joints", Vacuum, Vol. 109, pp. 148–156, 2014 .

29.Mostaan, H., Shamanian, M., Monirvaghefi, S.M., Behjati, P., Szpunar, J. a., "Magnetic properties assessment of laser welded ultra-thin Fe–Co–V foils", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 615, pp. 56–64, 2014 .

30.Hall, R.C., "Magnetic Anisotropy and Magnetostriction of Ordered and Disordered Cobalt-Iron Alloys", Journal of Applied Physics, Vol. 31, pp. 157–158, 1960 .

۳۱.قاسمی علی، تئوری مغناطیس ها، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۰.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]