

Effect of Laser Line Interruption on the Structure and Magnetic Properties of GO-Silicon-Steel-Sheets in the Laser Scribing Process*

Research Article

Mohammad Reza Jahangiri¹ Hessam Bayani²
Mohammad Ardestani³

1. Introduction

Among silicon steel sheets, grain-oriented grades provide the most favorable magnetic properties (in the direction of rolling). In order to reduce core losses in these sheets, extensive research has been done in recent years and various methods have been developed, one of the most important of which is to refine the magnetic domains by applying tensile stresses on the surface of the sheets. Although relatively extensive research has been done on the optimization of laser process variables for reducing the core losses of GO silicon steel sheets, but as far as the authors know, no systematic research has been done about the effect of laser line interruption on the structure of the domains as well as core losses of silicon steel sheets. Since the interruption of laser lines, due to the lack of scribing of some parts of the sheet surface, can cause less damage to their surface coating, if the core losses of these sheets are significantly reduced, it will have a favorable potential for application. On the other hand, various researches have shown that the application of an external magnetic field can change the structure of the domains by creating tensile or compressive stresses in different directions of the sheets. Therefore, it is possible that by using an external magnetic field during the discontinuous laser process, the final structure of the domains after the laser process will be different compared to the condition without magnetic field, and therefore the magnetic properties of the final sheets will also be different. Considering these conditions and the importance of investigating the effect of interrupted laser line patterns on the magnetic properties of GO silicon steel sheets, especially when the sheets are placed in an external magnetic field during laser scribing, the results of the present research can improve the existing knowledge in this field and provide more possibility to improve the magnetic properties of electrical steel sheets.

2. Experimental

The silicon steel sheet used in the present research was a GO sheet with high permeability. In this research, sheets with a thickness of 0.3 mm and dimensions of 30 cm × 3 cm (larger dimension in the rolling direction) were used.

For laser radiation, a pulse fiber laser with a maximum power of 20 watts, a wavelength of 1064 nm with a spot size of 50 micrometers and a working frequency of 20 kHz

was used. In addition, a number of sheets were placed under an external magnetic field with an applied intensity of 0.7 Tesla along the length of the sheets during laser irradiation with different patterns. The core loss of the sheets was measured in a Soken DAC-BHW-2 device. Core loss measurement experiments were performed at a magnetic flux density of 1.7 Tesla and a frequency of 50 Hz.

In this research, after optimizing the parameters of the conventional laser process, the effect of different interrupted and continuous patterns of laser lines with and without applying an external magnetic field was investigated on the core losses and the structure of the magnetic domains of steel sheets. The schematic of different patterns of laser irradiation process on the surface of silicon steel sheets is given in Fig. 1.

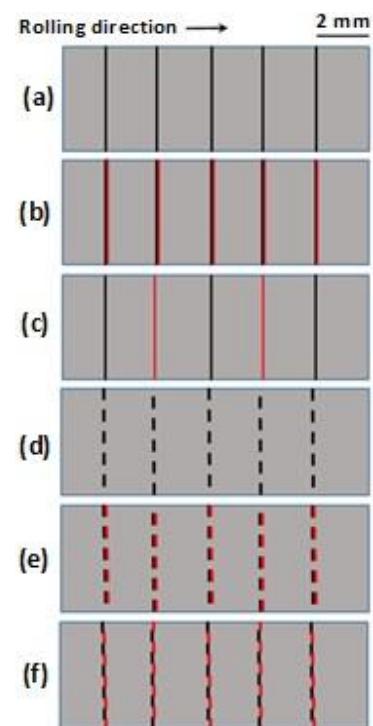


Fig. 1. Schematic of different laser patterns on the surface of silicon steel sheets. Black lines represent laser radiation on the upper surface and red lines represent laser radiation on the lower surface. It should be noted that the distance between the breaks is one of the variables examined in this research and therefore it is not necessarily the same in all patterns.

3. Results and discussion

The results showed that during the laser scribing of GO Si-steel sheets, if the interruption length is small such as 2 mm, the effect of the laser process on reducing the losses of silicon steel sheets is insignificant. With the increase of the interruption length to about 6 mm, the losses of the sheets are reduced largely (Fig. 2), and then by increasing

* Manuscript received; 7 December 2021, Revised, 1 May 2022, Accepted, 4 July 2022.

¹ Corresponding Author, Assistant professor, Metallurgy Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

Email: mjahangiri@nri.ac.ir.

² M.S.c Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Assistant professor, Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

the length of the discontinuity again to about 10 mm, the positive effect of laser-scribing in reducing the losses decreases again.

Such conditions are true for one-sided or two-sided laser radiation on the surface of the silicon steel sheets. It is difficult to interpret these changes now, but it can be predicted that the length of the interruption of 6 mm has created the most suitable tension conditions on the surface of the sheets to reduce the size of the magnetic domains and thus reduce the losses of these sheets.

The effect of laser line interruption length on the structure of magnetic domains is shown in Fig. 3. This figure shows that in the condition that the length of the laser lines is 2 mm (Fig. 3-a), domain sizes in the 4 mm distance between two similar lines are not reduced at all. By increasing the length of the interruption to 4 and 6 mm, better results have been obtained and the conditions are more or less optimal when the length of the interruption is 6 mm (Fig. 3-c). The results of this research also showed that when the laser lines are irradiated intermittently and with an interruption length of 6 mm on both sides of the sheet surfaces in such a way that the laser lines on one side cover the un-irradiated part on the other side, core loss of steel sheets is reduced. It seems that these conditions have led to the optimization of the absorbed energy on the surface of the sheets and the creation of the most suitable conditions for forming the desired tensile stresses to reduce the width of the magnetic domains.

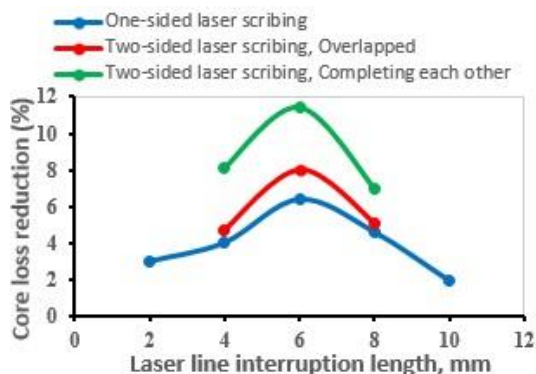


Fig. 2. The effect of the length of the laser interruption on the core loss reduction of silicon steel sheets. The power of the laser device 20 W, the radiation frequency: 20 kHz, the linear speed of the laser 1500 mm/s.

Based on the results of the above experiments, the optimal samples were selected and the effect of the simultaneous use of an external longitudinal magnetic field during laser irradiation on the surface of these sheets was investigated. Results showed that the use of an external magnetic field along the length of the sheets (rolling direction of the sheets) during the laser-scribing of the surface of the silicon steel sheets has led to a significant improvement in the magnetic properties of the sheets, such that even in the condition of interruption of the laser lines, the use of an external magnetic field has reduced core losses to the extent of samples with continuous and two-sided laser lines.

The reason for this can be the positive effect of the external magnetic field in creating tensile stresses on the

surface of the sheets. As a result, a significant change in the width of the magnetic domains, which after laser irradiation; either intermittently or continuously; lead to a favorable refinement in the size of the magnetic domains leading to a great reduction in the core losses of the sheets.

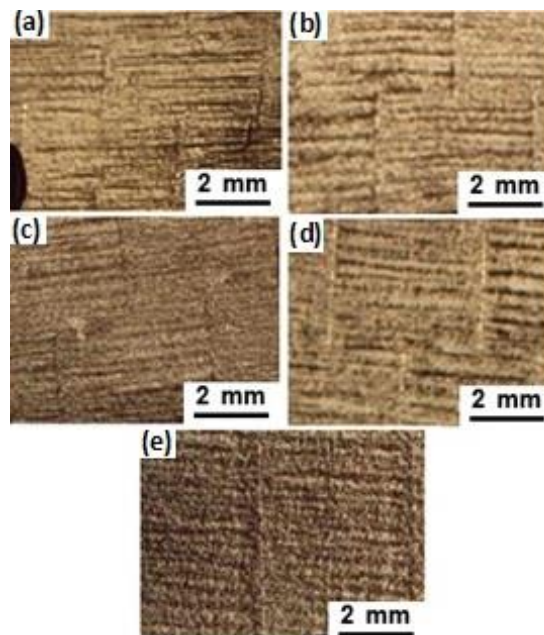


Fig. 3. The effect of the interruption length on the structure of magnetic domains in the condition that the laser is irradiated on only one side of the sheets. The length of the interruption is equal to: a) 2 mm, b) 4 mm, c) 6 mm, d) 8 mm and e) 10 mm.

4. Conclusion

In this research, the effect of different patterns of interruptions of laser lines in the presence/absence of an external magnetic field was investigated on the structure of magnetic domains and core losses of silicon steel sheets. The most important results are:

- 1- When the length of discontinuity of laser lines on the surface of silicon steel sheets is chosen to be around 6 mm, more suitable magnetic properties are obtained for the silicon steel sheets.
- 2- During the optimal interruption conditions, if the interrupted laser lines are irradiated on both sides of the sheets in such a way that the laser lines on one side cover the non-irradiated part on the other side, the losses of the silicon steel sheets are greatly reduced.
- 3- The use of an external magnetic field in the rolling direction of silicon steel sheets during discontinuous double-sided laser scribing of their surface in such a way that the length of the discontinuity is about 6 mm, causes the greatest reduction in core losses and significant improvement of their magnetic properties.

تأثیر انقطاع خطوط لیزر بر ساختار و خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار در فرایند حکاکی لیزر*

مقاله پژوهشی

محمد رضا جهانگیری^(۱) حسام بیانی^(۲) محمد اردستانی^(۳)

چکیده در تحقیق حاضر تاثیر انقطاع خطوط لیزر در حین فرایند حکاکی لیزر در حضور/عدم حضور یک میدان مغناطیسی خارجی بر روی تلفات هسته و ساختار حوزه های مغناطیسی در ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت‌دار بررسی شد. با اعمال الگوهای مختلف انقطاع، تاثیر طول انقطاع، یک طرفه یا دو طرفه اعمال کردن لیزر و نیز همپوشانی یا غیرهمپوشانی خطوط لیزر (برای ورق‌های حکاکی شده دو طرفه) بر روی ساختار دامین‌ها و تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی ارزیابی شد. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، شرایط بهینه حکاکی لیزر منقطع روی سطح ورق‌ها بدست آمد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد اگرچه در طول‌های انقطاع کوچک نظیر ۲ میلی‌متر، تاثیر فرایند لیزر روی کاهش تلفات ورق‌ها ناچیز است، اما با افزایش طول انقطاع به حدود ۶ میلی‌متر، تلفات مغناطیسی ورق‌ها تا حد زیادی بهبود می‌یابد. با افزایش مجدد طول انقطاع تا حدود ۱۰ میلی‌متر، تلفات ورق‌ها دوباره افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که طول انقطاع ۶ میلی‌متر، تلفات مغناطیسی بهینه را در ورق‌ها ایجاد می‌نماید. استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی طولی همراه با تابش لیزر منقطع با الگوی انقطاع بهینه، منتج به کاهش تقریباً ۱۶ درصد تلفات هسته در فولادهای سیلیکونی جهت‌دار می‌شود.

واژه‌های کلیدی فولاد سیلیکونی جهت دار، حکاکی با لیزر، انقطاع لیزر، ساختار دامین، تلفات هسته.

مقدمه

سیلیکونی، پرمصرف‌ترین و در عین حال ارزان‌ترین آن‌ها هستند. این نوع فولادها عموماً به صورت ورق‌های نازکی تولید می‌شوند که وظیفه انتقال شار مغناطیسی را در تجهیزات الکتریکی نظیر ترانسفورماتورها و الکتروموتورها به صورت مناسب و همراه با حداکثر راندمان برعهده دارند [4-6].

در میان ورق‌های فولادی سیلیکونی، ورق‌های با دانه های جهت‌دار مطلوبترین خواص مغناطیسی را (در جهت نورد) ارائه می‌دهند. این ورق‌ها عمدتاً ۳-۳/۳ درصد وزنی سیلیسیم دارند و در ضخامت‌های بین ۰/۳۵-۰/۲۳ میلی‌متر تولید می‌شوند [7]. برای کاهش تلفات هسته در این ورق‌های جهت‌دار در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای انجام شده و روش‌های مختلفی توسعه یافته است که یکی از مهمترین آنها اصلاح دامین‌های (حوزه‌های) مغناطیسی از طریق اعمال تنش‌های کششی روی سطح ورق‌هاست [8-10]. تنش‌های کششی می‌توانند بصورت یکنواخت و از طریق اعمال پوشش‌های مناسب روی سطح ورق‌ها بدست آیند [11,12]. روش دیگر، ایجاد

مواد مغناطیسی بر اساس مشاهده رفتارشان در میدان مغناطیسی به دسته‌بندی‌های متفاوتی تقسیم می‌شوند. در دقیق‌ترین حالت تقسیم‌بندی رفتار مواد با استفاده از حلقه هیستریزس به پنج دسته دیامغناطیس، پارامغناطیس، آنتی‌فرومغناطیس، فرومغناطیس و فری‌مغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند [1-2]. در تقسیم‌بندی عمومی تری سه دسته اول را به علت اثر ناچیز در میدان مغناطیسی در شرایط معمول، ماده غیرمغناطیسی و دو دسته باقی‌مانده را ماده مغناطیسی می‌گویند [2].

مواد مغناطیسی بر اساس سهولت مغناطیسی شدن و از دست دادن خاصیت مغناطیسی به دو دسته نرم و سخت تقسیم‌بندی می‌شوند. معمول‌ترین مواد مغناطیسی نرم شامل آلیاژهای آهن، آلیاژهای نیکل، آلیاژهای کبالت و سرامیک‌های نرم هستند [1-3] که در این میان آلیاژهای آهنی با توجه به خواص مغناطیسی مناسب و قیمت پایین، پرمصرف‌ترین آن‌ها است. در میان انواع مختلف مواد مغناطیسی نرم، فولادهای الکتریکی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۱۳ می‌باشد.

Email: mjahangiri@nri.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه پژوهشی متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

(۲) کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانش آموخته واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاکنون هیچ تحقیق سیستماتیکی در خصوص تأثیر انقطاع خطوط لیزر تابیده شده روی سطح ورق‌ها بر روی ساختار دامین‌ها و همچنین تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی انجام پذیرفته است. از آنجایی که انقطاع خطوط لیزر، بدلیل عدم حکاکی بخش‌هایی از سطح ورق‌ها می‌تواند باعث آسیب دیدگی کمتر پوشش سطحی آنها گردد، در صورت کاهش قابل ملاحظه تلفات هسته این ورق‌ها، پتانسیل مطلوبی جهت کاربرد و عملیاتی شدن خواهد داشت. علاوه بر موضوع انقطاع خطوط لیزر در حین حکاکی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار، استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در حین اعمال لیزر متقاطع روی سطح ورق‌ها نیز یکی دیگر از نوآوری‌های مورد نظر در این تحقیق بوده است. تحقیقات مختلف [24, 25] نشان داده است که اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، می‌تواند با ایجاد تنش‌های کششی یا فشاری در جهات مختلف ورق‌ها، ساختار دامین‌های آنرا تغییر دهد. بنابراین این احتمال می‌رود که با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در حین فرایند لیزر متقاطع، ساختار نهایی حوزه‌ها پس از فرایند لیزر نسبت به شرایط بدون میدان مغناطیسی متفاوت باشد و لذا خواص مغناطیسی ورق‌های نهایی نیز متفاوت باشد.

با توجه به این شرایط و اهمیت بررسی تأثیر الگوهای تابش لیزر منقطع روی خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار، بخصوص در شرایطی که ورق‌ها در حین تابش لیزر تحت یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گرفته باشند، نتایج تحقیق حاضر می‌تواند دانش موجود در این زمینه را افزایش داده و امکان بیشتری را برای بهبود خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد الکتریکی فراهم نماید.

روش تحقیق

ورق فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع ورق‌های جهت‌دار با نفوذپذیری بالا (گرید M110-30P مطابق با استاندارد EN10107-2014) بود. در این تحقیق از ورق‌هایی به ضخامت 0.3 mm و با ابعاد 30 cm در 3 cm (بعد بزرگتر در جهت نورد ورق) استفاده شده است. این ورق‌ها که دارای یک پوشش سطحی دولایه بودند، از شرکت ایران ترانسفو ری تهیه شدند. این شرکت ورق‌های خود را از شرکت روسی سازنده ورق‌های

تنش‌های کششی موضعی است که بطور عمده با فرایندهایی نظیر ایجاد خراش‌های مکانیکی یا حکاکی لیزر روی سطح ورق‌ها حاصل می‌شود [10, 13-15].

استفاده از تنش‌های کششی موضعی در راستای نورد با تغییر انرژی مگنتواستاتیک، اندازه حوزه‌های مغناطیسی 180° درجه را کاهش می‌دهد. بنابراین، این تنش‌های کششی منجر به کاهش تلفات جریان‌های گردابی غیرعادی در ورق‌ها می‌شوند [14-17]. با این حال، اگر مقدار تنش کششی موضعی از محدوده بهینه آن افزایش یابد، حرکت دیواره‌های مغناطیسی را در حین مغناطیس شدن تناوبی دشوار می‌کند. بنابراین، می‌تواند منجر به افزایش تلفات هیستریزس ورق‌ها شود [14, 18, 19]. بر این اساس، کنترل پارامترهای فرایند لیزر ورق‌های فولاد سیلیکونی نظیر انرژی پرتوهای تابشی، فاصله بین خطوط لیزر، ابعاد نقاط تابش شده روی سطح و ... برای دستیابی به بهترین خواص مغناطیسی بسیار مهم است.

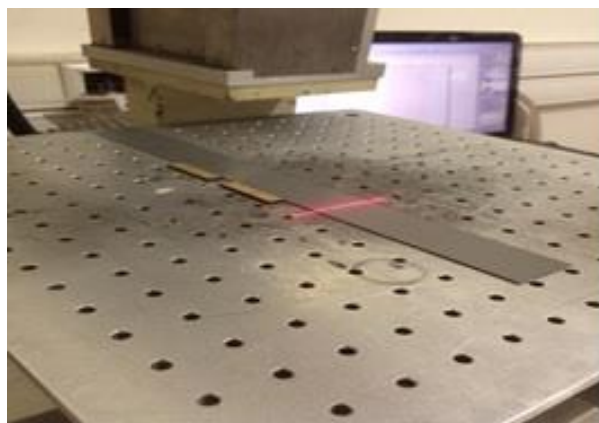
در فرایند تابش لیزر، پرتوهایی از لیزرهای پالسی یا پیوسته بصورت خطوطی در راستای عمود بر جهت نورد (جهت ایجاد تنش‌های کششی در راستای نورد ورق‌ها و اصلاح حوزه‌های 180° درجه) و به فواصل تقریبی $10-1 \text{ mm}$ یکدیگر متناسب با انرژی پرتو لیزر مورد استفاده، روی سطح ورق‌ها تابیده می‌شود. با این عملیات، عرض دامین‌های مغناطیسی تا حد مناسبی کاهش یافته و در نتیجه از تلفات مغناطیسی ورق‌ها نیز کاسته می‌شود [14, 15]. هرگونه تغییر در ابعاد نقاط پرتو لیزر، طول موج، متوسط انرژی در هر پالس (در لیزر پالسی)، مقدار انرژی در طول (در لیزر پیوسته)، کیفیت پرتو لیزر و سایر خصوصیات پرتو لیزر در تغییر تلفات مغناطیسی (هسته) ورق‌ها اهمیت زیادی دارد و لذا بهینه سازی هر کدام از متغیرهای دستگاهی و فرایندی برای دسترسی به خواص بهینه بسیار ضروری است.

اگرچه تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای در مورد کاربرد انواع لیزر و بهینه سازی متغیرهای فرایند لیزر متداول برای کاهش تلفات هسته ورق‌های فولادی سیلیکونی جهت دار انجام پذیرفته است [13-15] و [20-22] و همچنین به تازگی جهانگیری و همکاران تحقیقی در زمینه اثرات تابش لیزر دو طرفه بر روی ساختار حوزه‌های مغناطیسی و تلفات انرژی ورق‌های فولاد سیلیکونی انجام داده اند [23]، اما تا آنجا که نویسندگان مقاله حاضر می‌دانند

فولاد سیلیکونی با نام NLMK تهیه و خریداری کرده بود. شکل (۱) تصویر این ورق‌ها را نشان می‌دهد.

تلفات هسته در چگالی شار مغناطیسی $1/7$ تسلا و فرکانس ۵۰ هرتز انجام شد. اگر تلفات مغناطیسی را قبل از تابش لیزر روی سطح ورق‌ها با P_0 و تلفات مغناطیسی را پس از استفاده از لیزر با P_1 نمایش دهیم، میزان کاهش تلفات هسته با فرمول $\eta = (P_0 - P_1) / P_0$ نشان داده می‌شود.

شکل ۱ تصویر ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر



شکل ۲ دستگاه لیزر فایبر مورد استفاده در تحقیق حاضر در حین فرآیند اعمال لیزر روی سطح ورق‌ها

جهت تعیین ترکیب شیمیایی ورق‌ها، یکی از نمونه‌ها پس از حذف پوشش، تحت آزمون آنالیز عنصری به روش اسپکتروسکوپی نوری قرار گرفت. به منظور مشاهده دانه‌بندی، ابتدا یک نمونه از یکی از ورق‌ها به ابعاد مناسب برش داده شد و سپس توسط سنباده ۸۰ پوشش زدایی شده و بدنبال آن با استفاده از سنباده‌های ۱۲۰ تا ۱۲۰۰ آماده سازی شد. پس از آن ابتدا در محلول $5\text{ml}(\text{HF})+80\text{ml}(\text{H}_2\text{O}_2)+15\text{ml}(\text{H}_2\text{O})$ به مدت ۶۰ ثانیه پولیش شیمیایی شد تا سطح آن تمیز و براق گردد و پس از آن در محلول $20\% \text{H}_3\text{PO}_4+4\% \text{H}_2\text{O}_2+1\% \text{HF}+75\% \text{H}_2\text{O}$ به مدت ۱۵ ثانیه اچ گردید.

در این تحقیق برای بهینه سازی پارامترهای "فرایند متداول" تابش لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی، آزمایشهای مقدماتی صورت پذیرفت. منظور از فرایند متداول تابش لیزر، تابش پرتوهای لیزر بر روی یک طرف ورق‌ها بصورت خطوط ساده، موازی و پیوسته (غیر منقطع) در راستای عمود بر جهت نورد ورق‌ها است. با توجه به ارائه نتایج این آزمایشهای مقدماتی در مرجع [23]، از ذکر مجدد آنها صرف نظر می‌شود و نتایج بدست آمده تنها جهت مقایسه با نتایج کار حاضر بیان خواهند شد. پس از بهینه سازی پارامترهای فرایند متداول لیزر، تأثیر الگوهای مختلف انقطاع و پیوسته خطوط لیزر با و بدون اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، بر تلفات هسته و ساختار حوزه های مغناطیسی ورق های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. شماتیک الگوهای مختلف فرایند تابش لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی در شکل (۳) آورده شده است.

برای تابش لیزر از لیزر پالسی فایبر با قدرت حداکثر ۲۰ وات، طول موج 1064 نانومتر با نقطه اثری به اندازه 50 میکرومتر و فرکانس کاری 20 کیلوهرتز (20000 پالس بر ثانیه) استفاده شد. شکل (۲) تصویری از دستگاه لیزر مورد استفاده را در حین تابش لیزر روی سطح یکی از ورق‌های فولاد سیلیکونی نشان می‌دهد. همچنین تعدادی از ورق‌ها در حین تابش لیزر با الگوهای مختلف، تحت یک میدان مغناطیسی خارجی با شدت اعمال $0/7$ تسلا در راستای طول ورق‌ها واقع شدند. روند و تجهیزات مورد استفاده در این عملیات در مرجع [23] ذکر شده است.

برای اندازه گیری تلفات مغناطیسی، از دستگاه آزمون تک ورق استفاده شد. اندازه گیری تلفات هسته ورق‌ها در یک دستگاه

حوزه در دانه‌های مختلف هر ورق اندازه‌گیری شد و میانگین این اندازه‌گیری‌ها محاسبه و گزارش شد.



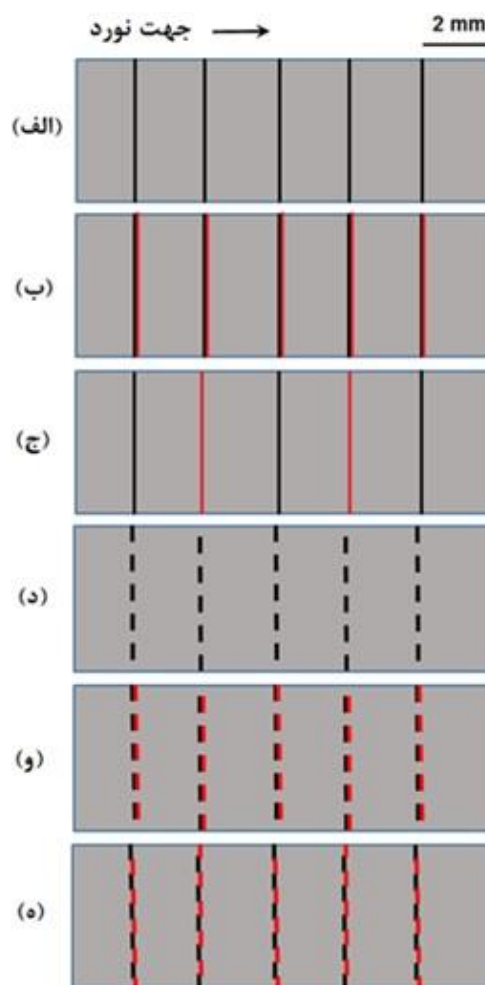
شکل ۴: نمایی از سطح ورق فولاد سیلیکونی پس از اعمال سوسپانسیون و ظهور حوزه‌های مغناطیسی برای اندازه‌گیری متوسط عرض آن

نتایج و بحث

جدول (۱) ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. همانگونه که در این جدول مشخص است سیلیسیم عنصر آلیاژی اصلی موجود در ترکیب شیمیایی فولاد مورد نظر می‌باشد و مقدار آن ۳/۲۵ درصد وزنی است. در این ورق‌ها میزان کربن باید در حد خیلی پایین باشد تا خواص مغناطیسی و مخصوصاً نفوذپذیری مغناطیسی و تلفات هسته با گذر زمان تخریب نگردد. بر طبق مرجع [26] علت اصلی افت خواص مغناطیسی با گذر زمان، نفوذ و تجمع اتم‌های کربن به گونه‌ای است که منجر به سخت شدن حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی می‌شود.

شکل (۵) بخشی از ساختار اچ شده ورق‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. در این ساختار، دانه‌های کوچک‌تر ابعادی در حدود ۱-۵ میلی‌متر داشته و دانه‌های درشت‌تر که قسمت اعظم ساختار را تشکیل می‌دهند بسیار بزرگ بوده و ابعاد برخی از آن‌ها به ۲ سانتی‌متر می‌رسد. ریزساختار بطور کامل فریتی است.

شکل (۶) تصویر حوزه‌های مغناطیسی در ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد بررسی در تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود حوزه‌های مغناطیسی در دانه‌های مختلف به حالت درشت و ریز موجود بوده و با زاویه کمی از جهت نورد قرار گرفته‌اند. عرض این حوزه‌ها به موارد مختلفی از جمله شرایط تنشی و میزان انحراف از بافت گوسی (چه به صورت جهتی و چه به صورت صفحه‌ای) بستگی دارد. متوسط ابعاد حوزه‌ها در این ورق‌ها در حدود ۰/۹ میلی‌متر بدست آمد.



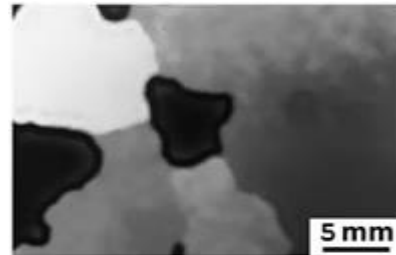
شکل ۳: شماتیک الگوهای مختلف لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی، خطوط مشکی نشان‌دهنده تابش لیزر روی سطح فوقانی و خطوط قرمز نمایانگر تابش لیزر روی سطح زیرین است. لازم به ذکر است که فاصله بین انقطاع‌ها، جزء متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق بوده و لذا لزوماً در کلیه الگوها، یکسان نبوده است.

برای بررسی و تعیین ساختار حوزه‌های مغناطیسی سطحی ورق‌ها بدون برداشتن پوشش آنها از روش پودر مغناطیسی (روش بیتر) استفاده شد. در این روش، ذرات مغناطیسی بسیار ریز که در جوهر مغناطیسی معلق هستند (سوسپانسیون کلوتیدی مغناطیسی) به دلیل نشت شار مغناطیسی از دیواره حوزه‌های مغناطیسی، در این مناطق جذب شده و کتراست لازم را جهت مشاهده حوزه‌ها ایجاد می‌نمایند. بنابراین، ساختار حوزه‌ها بر روی کل سطح ورق‌ها مشاهده شد (شکل ۴)، و تصاویر لازم با یک میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی‌های دلخواه به دست آمد. به منظور برآورد اندازه حوزه‌های مغناطیسی، عرض حداقل ۱۰

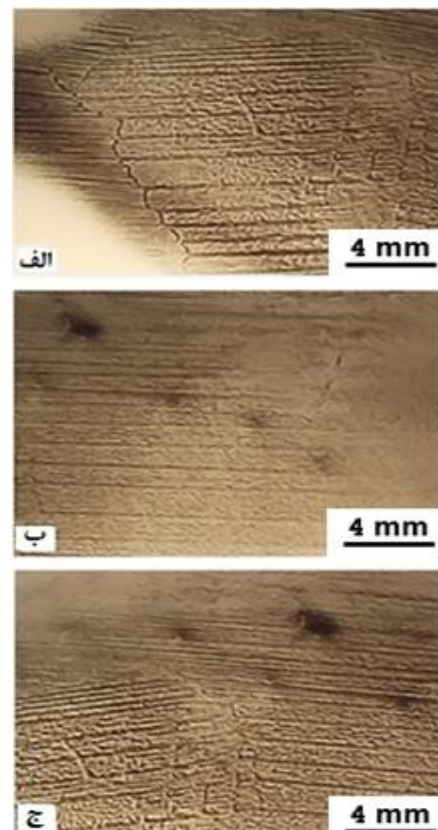
جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر (بر حسب درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
Base	<0.001	3.25	0.0957	0.0258	0.00020	0.131
Ni	Mo	Al	Co	Cu	Nb	Ti
0.0118	0.0084	0.0083	0.0018	0.0057	0.0067	<0.00020
V	W	Pb	Sn	Ca	Ta	B
0.0014	0.0013	0.0033	0.0731	0.001	0.0057	0.0011

آزمایش‌های انجام شده در مراحل مقدماتی (تابش لیزر روی یک طرف سطوح ورق‌ها به صورت خطوط پیوسته (نامقطع) با انرژی تابشی، سرعت لیزرینگ و فواصل گوناگون) نشان داد که با بهینه سازی پارامترهای لیزرینگ همراه با کنترل فواصل بین خطوط لیزر می توان تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی انتخابی را به میزان ۹/۷ درصد کاهش داد [23]. این آزمایش‌های اولیه که مشابه فعالیت‌های انجام شده در مراجع مختلف بود، نتایج مشابهی نیز ارائه نمود و همان محدوده کاهش ۸-۱۰ درصدی در تلفات توان را ایجاد نمود [8,10] و [13-15] و [20-22]. تفاوت شرایط انتخابی در آزمایش‌های انجام شده به روش متداول در تحقیق حاضر با آزمایش‌ها و نتایج دیگر تحقیقات منتشر شده در این زمینه آن بود که در تحقیق حاضر از همان ابتدا، مقدار انرژی به ازاء هر پالس لیزر کمتر از محدوده‌های پیشنهادی در مراجع مختلف انتخاب شد که این امر به دو دلیل صورت پذیرفت. دلیل اول لزوم کاهش انرژی انتقالی به سطح ورق‌های پوشش دار است تا بتوان حداقل آسیب را به پوشش سطحی ورق‌ها وارد نمود. بدیهی است که با کاهش انرژی جذب شده روی سطح ورق‌ها، میزان افزایش دمای موضعی، ذوب و تبخیر سطحی آلیاژ و پوشش کاهش یافته و از این نظر مزایای بیشتری حاصل می شود. اگرچه در مراجع مختلف از انرژی‌های بالاتر برای حکاکی لیزر ورق‌های فولاد سیلیکونی استفاده شده است، اما برای اطمینان از عایق بودن الکتریکی سطوح ورق‌ها نسبت به یکدیگر، اعمال پوشش‌های ثانوی روی سطح ورق‌ها پس از تابش لیزر الزامی بوده است که این موضوع منجر به افزایش هزینه‌ها نیز گردیده است. دلیل دوم نیز محدودیت توان دستگاه انتخابی بود که امکان ایجاد انرژی‌های بیشتر در هر پالس را فراهم ننمود.



شکل ۵ ساختار و دانه‌بندی ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر



شکل ۶ حوزه‌های مغناطیسی در بخش‌های مختلف ورق‌های فولاد سیلیکونی که با استفاده از روش بتتر آشکار شده‌اند. شکل‌های (الف)، ب و ج) از بخش‌های مختلف سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی قبل از اعمال لیزر بدست آمده اند

سوال مطرح است که هنگامیکه لیزر بصورت منقطع روی یک طرف یا دو طرف ورق‌ها اعمال می‌گردد، آیا طول انقطاع خطوط لیزر روی سطح، اثری بر میزان تنشهای کششی باقیمانده و در نتیجه خواص مغناطیسی ورق‌ها خواهد داشت؟ و آیا همپوشانی خطوط منقطع لیزر روی دو طرف ورق‌ها اثر بیشتری بر جای خواهد گذاشت یا غیر همپوشانی آنها؟

با توجه به این ایده، در ابتدا آزمایش‌ها بگونه‌ای طراحی و اجرا شد که خطوط منقطع لیزر با فواصل انقطاع متفاوت (از ۲ تا ۱۰ میلیمتر) تنها روی یک طرف ورق‌ها اعمال گردند. نتایج این سری از آزمایش‌ها در ردیف‌های ۴ الی ۸ جدول (۲) ارائه شده اند. سپس، آزمایش‌های دیگر بگونه‌ای صورت پذیرفت که خطوط منقطع لیزر روی یک طرف ورق‌ها، محل انقطاع و ناپیوستگی سمت دیگر ورق‌ها را بپوشانند. نتایج این آزمایش‌ها در ردیف‌های ۹ الی ۱۱ جدول (۲) ارائه شده است. بالاخره، آزمایش‌هایی طراحی شد که خطوط لیزر تابشی بصورت منقطع روی دو طرف سطوح ورق‌ها بطور دقیق روی هم منطبق گردند. نتایج این سری از آزمایش‌ها نیز در ردیف‌های ۱۲ الی ۱۴ جدول (۲) گزارش شده اند.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در اثر انقطاع خطوط لیزر تابشی روی یک سمت ورق‌ها، اگرچه در طول‌های انقطاع کوچک نظیر ۲ میلیمتر، تاثیر فرایند لیزر روی کاهش تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی ناچیز است، اما با افزایش طول انقطاع به حدود ۶ میلیمتر، تلفات ورق‌ها تا حد زیادی کاهش می‌یابد (شکل ۷)، و سپس با افزایش مجدد طول انقطاع تا حدود ۱۰ میلیمتر، دوباره اثر مثبت لیزرینگ در کاهش تلفات کمتر می‌شود. چنین شرایطی برای تابش دوطرفه لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد نظر نیز صادق است. توجه این تغییرات در حال حاضر دشوار می‌نماید اما با توجه به اینکه مکانیزم اصلی کاهش تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار در اثر حکاکی سطح آنها با اشعه لیزر به ایجاد تنشهای کششی کنترل شده در راستای نورد ورق‌ها و کاهش عرض دامینهای اصلی ۱۸۰ درجه مربوط می‌شود، می‌توان پیش بینی نمود که طول انقطاع ۶ میلیمتر، مناسب ترین شرایط تنش را در سطح ورق‌ها برای کاهش اندازه دامینهای مغناطیسی و در نتیجه کاهش تلفات این

با توجه به نتایج اخذ شده از آزمایش‌های متداول و آگاهی از اینکه استفاده از انرژی‌های بیشتر روی سطوح ورق‌ها (تا حدی که منجر به ایجاد عیب در ساختار و افزایش تلفات هیستریزیس نگردد) می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های کششی بیشتر روی سطح و کاهش احتمالی بیشتر در تلفات هسته ورق‌های سیلیکونی گردد، تصمیم گرفته شد تا بجای اعمال لیزر روی یک طرف ورق، این عملیات روی دو طرف سطح ورق‌ها اعمال گردد. بعبارت دیگر افزایش انرژی جذب شده از طریق اعمال لیزر به دو طرف سطح ورق‌ها تامین گردد تا بدینوسیله ضمن آسیب رساندن کمتر به پوشش سطحی، امکان کاهش تلفات بیشتری نیز فراهم گردد. نتایج این طرح دو طرفه تابش لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی که در مقالات منتشر شده از سوی نویسندگان مقاله حاضر چاپ شده است [23]، نشان داد که دوطرفه اعمال کردن لیزر می‌تواند باعث بهبود خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی گردد. اعمال لیزر روی هر دو طرف (دو سطح) ورق‌های فولاد سیلیکونی توانسته است منجر به ایجاد تنشهای کششی بیشتر و در نتیجه کاهش بیشتر تلفات هسته ورق‌ها گردد. این امر بخصوص هنگامی مشهود است که خطوط لیزر اعمالی روی یک طرف ورق‌ها دقیقا روی سطح طرف مقابل منطبق گردد. در چنین شرایطی تلفات هسته نسبت به حالت یک طرفه اعمال کردن لیزر در حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد که اعمال لیزر روی دو طرف ورق‌های فولاد سیلیکونی تا حدودی خاصیت جمع پذیری داشته باشد. همانگونه که پیشتر ذکر شد این نکته از آن جهت ارزش فراوانی دارد که می‌تواند باعث شود با تقسیم انرژی لیزر تابشی روی دو طرف ورق، آسیب کمتری را به پوشش سطحی ورق‌ها وارد نمود. نتایج این دو نوع آزمایش (روش متداول و همچنین روش دوطرفه لیزر کردن ورق‌های فولاد سیلیکونی) در ردیف‌های اول تا سوم جدول (۲) ارائه شده است.

نتیجه مهم دیگری که از انجام آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد تاثیر انقطاع خطوط لیزر در حالت اعمال یک طرفه لیزر و یا اعمال دوطرفه آنها است. تاکنون در هیچ مدرکی، به اثر انقطاع خطوط لیزر یا پیوستگی آنها روی خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی اشاره ای نشده است. بنابراین، این

ورق‌ها ایجاد نموده باشد.

میلی‌متری بین دو خط مشابه به هیچ عنوان ریز نشده اند. با افزایش طول انقطاع به ۴ و ۶ میلی‌متر، نتایج بهتری حاصل شده و شرایط در حالتی که طول انقطاع برابر ۶ میلی‌متر باشد (شکل ۸-ج)، کمابیش در حالت بهینه قرار دارد.

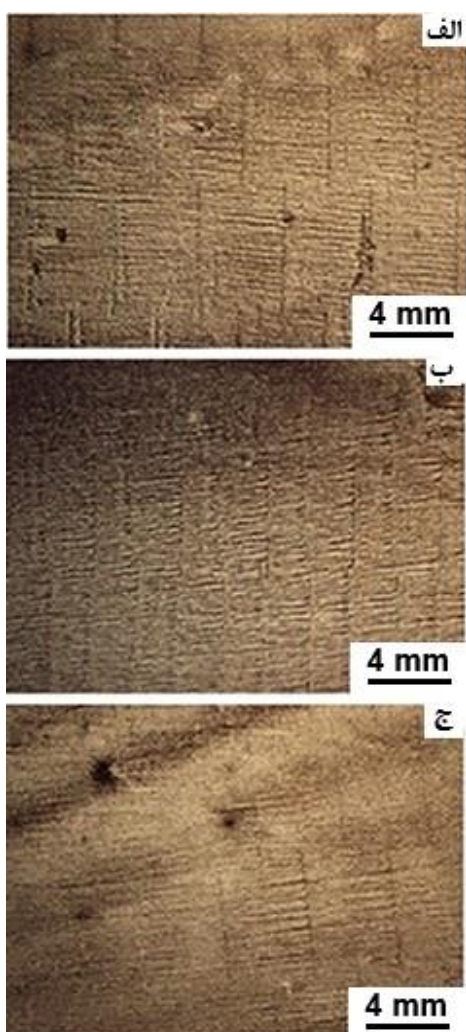
تاثیر طول انقطاع خطوط لیزر بر ساختار حوزه‌های مغناطیسی در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در شرایطی که طول انقطاع خطوط لیزر ۲ میلی‌متر باشد (شکل ۸-الف)، حوزه‌های مغناطیسی موجود در حدفاصل ۴

جدول ۲ تأثیر الگوهای انقطاع خطوط لیزر و نیز یکطرفه/دوطرفه اعمال کردن لیزر روی تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی، توضیحات مربوط به هر نمونه (الگو) در زیر جدول ارائه شده است

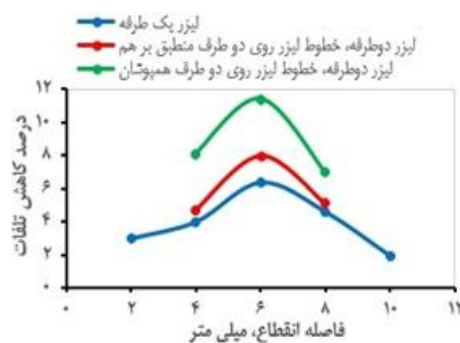
شماره نمونه	تلفات قبل از لیزر (W/Kg)	تلفات بعد از لیزر (W/Kg)	تغییرات تلفات (%)
۱	۱/۰۳	۰/۹۳	۹/۷
۲	۱/۰۳	۰/۹۱	۱۱/۶
۳	۰/۹۵	۰/۸۲	۱۳/۷
۴	۱/۰۱	۰/۹۸	۲/۹۷
۵	۱	۰/۹۶	۴
۶	۱/۱	۱/۰۳	۶/۴
۷	۱/۰۸	۱/۰۳	۴/۶
۸	۱/۰۱	۰/۹۹	۱/۹
۹	۰/۹۹	۰/۹۱	۸/۱
۱۰	۱/۰۵	۰/۹۳	۱۱/۴
۱۱	۱	۰/۹۳	۷
۱۲	۱/۰۷	۱/۰۲	۴/۷
۱۳	۱/۱۲	۱/۰۳	۸
۱۴	۰/۹۸	۰/۹۳	۵/۱

شرایط نمونه شماره ۱: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
 شرایط نمونه شماره ۲: فاصله خطوط لیزر ۴ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی هر دو طرف ورق، خطوط پشت و رو غیر منطبق
 شرایط نمونه شماره ۳: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی هر دو طرف ورق، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
 شرایط نمونه شماره ۴: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۲ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
 شرایط نمونه شماره ۵: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۴ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
 شرایط نمونه شماره ۶: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۶ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
 شرایط نمونه شماره ۷: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۸ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
 شرایط نمونه شماره ۸: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۱۰ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
 شرایط نمونه شماره ۹: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۴ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو غیر منطبق بر هم
 شرایط نمونه شماره ۱۰: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۶ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو غیر منطبق بر هم
 شرایط نمونه شماره ۱۱: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۸ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو غیر منطبق بر هم
 شرایط نمونه شماره ۱۲: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۴ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
 شرایط نمونه شماره ۱۳: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۶ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
 شرایط نمونه شماره ۱۴: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۸ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
 جدول ۲ تأثیر الگوهای انقطاع خطوط لیزر و نیز یکطرفه/دوطرفه اعمال کردن لیزر روی تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی، توضیحات مربوط به هر نمونه (الگو) در زیر جدول ارائه شده است

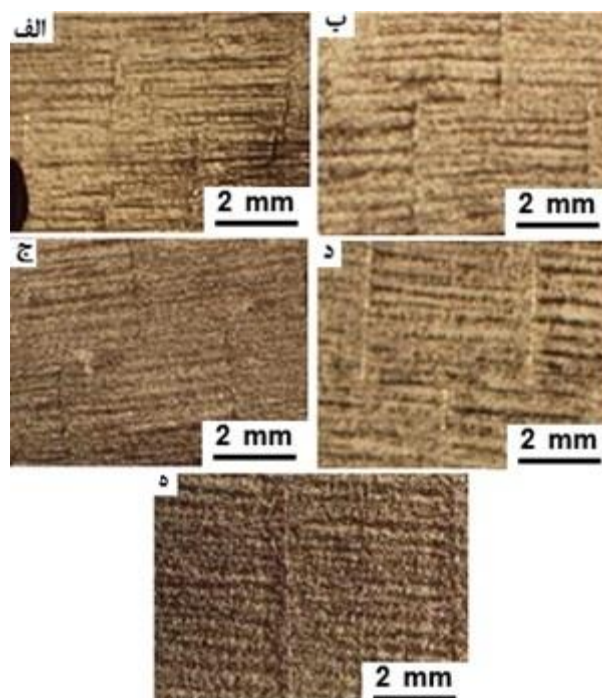
سیلیکونی بسیار چشمگیرتر و نزدیک به شرایط اعمال لیزر پیوسته روی دو طرف ورق (نمونه شماره ۳) بدست می‌آید. به نظر می‌رسد که این شرایط منجر به بهینه شدن انرژی جذب شده روی سطح ورق‌های مورد نظر و ایجاد مناسب‌ترین شرایط برای ایجاد تنشهای کششی مطلوب جهت کاهش عرض حوزه های مغناطیسی گردیده است. اثر الگوی انقطاع ۶ میلی‌متری در حالت تک‌رو و دورو با طرح منطبق و غیرمنطبق (مکمل و همپوشان) در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹ تأثیر طرح خطوط منقطع لیزر اعمال شده بر ساختار حوزه‌های مغناطیسی؛ (الف) طرح خطوط منقطع پشت و رو منطبق بر هم، (ب) طرح خطوط منقطع پشت و رو مکمل هم (همپوشان)، (ج) طرح خطوط منقطع یک طرفه. در کلیه این نمونه‌ها طول انقطاع ۶ میلی‌متر بوده است



شکل ۷ تأثیر طول (فاصله) انقطاع لیزر روی کاهش تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی، توان دستگاه لیزر ۲۰ W، فرکانس تابش: ۲۰ kHz، سرعت خطی لیزر ۱۵۰۰ mm/s



شکل ۸ تأثیر طول انقطاع بر ساختار حوزه‌های مغناطیسی در شرایطی که لیزر تنها روی یک طرف ورق‌های فولاد سیلیکونی تابیده شود. طول انقطاع برابر با: (الف) ۲ میلی‌متر، (ب) ۴ میلی‌متر، (ج) ۶ میلی‌متر، (د) ۸ میلی‌متر و (ه) ۱۰ میلی‌متر

نتایج تحقیق حاضر همچنین نشان می‌دهد هنگامیکه خطوط لیزر بصورت منقطع و با طول انقطاع ۶ میلی‌متر روی دو طرف سطوح ورق‌ها بگونه‌ای تابیده شوند که خطوط لیزر روی یک طرف، بخش تابیده نشده از سمت دیگر را بپوشاند (نمونه شماره ۱۰)، تحت این شرایط، کاهش تلفات ورق‌های فولاد

جدول ۳ تاثیر انقطاع خطوط لیزر یکطرفه/دوطرفه در حضور میدان مغناطیسی خارجی ۰/۷ تسلا بر روی تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی. توضیحات مربوط به هر نمونه در زیر جدول ارائه شده است

شماره نمونه	تلفات قبل از لیزر (W/Kg)	تلفات بعد از لیزر (W/Kg)	تغییرات تلفات (%)
۱۵	۱/۱۲	۰/۹۷	۱۳/۴
۱۶	۱/۱۵	۱/۰۳	۱۰/۴
۱۷	۱/۰۷	۰/۸۹	۱۶/۸
۱۸	۰/۸۹	۰/۷۷	۱۳/۵
۱۹	۱/۰۱	۰/۸۵	۱۵/۹

شرایط نمونه شماره ۱۵: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی یک طرف
شرایط نمونه شماره ۱۶: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۶ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف
شرایط نمونه شماره ۱۷: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی دو طرف و منطبق
شرایط نمونه شماره ۱۸: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۶ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف و منطبق (پشت و رو)

شرایط نمونه شماره ۱۹: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۶ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف و غیر منطبق (مکمل یا همپوشان)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تاثیر الگوهای مختلف انقطاع خطوط لیزر تابشی در حضور/عدم حضور یک میدان مغناطیسی خارجی روی ساختار حوزه‌های مغناطیسی و تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱. هنگامیکه طول انقطاع خطوط لیزر منقطع روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی در حدود ۶ میلی‌متر انتخاب گردد، خواص مغناطیسی مناسب تری برای ورق‌های مورد نظر بدست می‌آید.
۲. در طول انقطاع بهینه، اگر خطوط لیزر منقطع روی دو طرف ورق‌ها بگونه‌ای تاییده شوند که خطوط لیزر روی یک طرف، بخش تاییده نشده از سمت دیگر را بپوشاند، تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی بسیار کاهش یافته و مشابه شرایط اعمال لیزر

همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود در تصاویر (الف) و (ب) با توجه به این‌که انرژی بیشتری به سطح ورق وارد شده، ریزش‌دگی حوزه‌های مغناطیسی به میزان بیشتری اتفاق افتاده است. نکته قابل توجه دیگر در این شکل آن است که در حالتی که خطوط لیزر منقطع در پشت و روی ورق‌ها مکمل یکدیگر باشند و بطورکامل فاصله انقطاع یکدیگر را در سطح مقابل بپوشانند (نظیر طرح ه در شکل ۳)، ریزش‌دگی بیشتری در دامین‌ها صورت می‌گیرد که با نتایج آزمایش تست تلفات مغناطیسی ورق‌ها نیز تطابق دارد. به عبارت دیگر این شکل نشان می‌دهد که توزیع تنش‌های کششی که لیزر منقطع دو طرفه حالت مکمل در سطح ورق‌ها ایجاد می‌کند، به مراتب مطلوبتر از توزیع تنش‌های جمع شونده‌ای است که خطوط لیزر منقطع دوطرفه منطبق بر هم (نظیر طرح و در شکل ۳) ایجاد می‌کنند و الگوی مکمل دوطرفه منجر به ریزش‌شدن بیشتر حوزه‌های مغناطیسی می‌شود.

بر اساس نتایج آزمایش‌های فوق، نمونه‌های بهینه انتخاب گردید و تاثیر استفاده همزمان از یک میدان مغناطیسی طولی خارجی در حین تابش لیزر روی سطح این ورق‌ها بررسی شد. جدول (۳) نتایج به دست آمده از آزمایش تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی لیزر شده تحت میدان مغناطیسی طولی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در راستای طول ورق‌ها (جهت نورد ورق‌ها) در حین لیزر کردن سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی منجر به بهبود قابل ملاحظه در خواص مغناطیسی ورق‌ها شده است، بگونه‌ای که حتی در شرایط انقطاع خطوط لیزر نیز، استفاده از میدان مغناطیسی خارجی باعث کاهش تلفاتی در حد نمونه‌های با خطوط لیزر دو طرفه و پیوسته شده است (مقایسه نمونه‌های ۱۷ و ۱۹). دلیل این موضوع می‌تواند تاثیر مثبت میدان مغناطیسی خارجی در ایجاد تنش‌های کششی در سطح ورق‌ها و در نتیجه تغییر قابل ملاحظه در عرض دامین‌های مغناطیسی باشد [27-29] که پس از تابش لیزر؛ چه بصورت منقطع و چه بصورت پیوسته؛ منجر به کاهش مطلوب اندازه حوزه‌های مغناطیسی و در نتیجه کاهش فراوان در تلفات هسته ورق‌ها گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از پژوهشگاه نیرو بدلیل حمایت مالی از این تحقیق و همچنین شرکت ایران ترانسفوری بدلیل کمک در تهیه مواد اولیه مورد نیاز جهت این پژوهش قدردانی و تشکر می نمایند

پیوسته روی دو طرف سطح ورق‌ها می شود.

۳. استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در راستای نورد ورق‌های فولاد سیلیکونی در حین لیزر کردن دوطرفه و ناپیوسته سطح آنها بگونه ای که طول انقطاع در حدود ۶ میلیمتر باشد، باعث بیشترین میزان کاهش در تلفات هسته و بهبود قابل ملاحظه خواص مغناطیسی آنها می شود.

مراجع

- Cullity, B. D., and Graham, C. D., "Introduction to Magnetic Materials", Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, pp. 1-21, (2008).
- Krishnan, K.M., "Fundamentals and Applications of Magnetic Materials", First Edition, Oxford University Press, Oxford, (2016).
- Soinski, M. and Moses, A.J., "Anisotropy in Iron-Based Soft Magnetic Materials", Handbook of Magnetic Materials (Chapter 4), Vol. 8, Elsevier Science B. V, pp. 325-414, (1995).
- Sankara Subramanian, A.T., Meenalochini, P., Suba Bala Sathiya, S. and Ram Prakash, G., "A review on selection of soft magnetic materials for industrial drives", *Materials Today Proceedings*, Vol. 45, pp. 1591-1596, (2021).
- Krings, A., Boglietti, A., Cavagnino, A. and Sprague, S., "Soft magnetic material status and trends in electric machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, pp. 2405-2414, (2017).
- Herzer, G., "Modern soft magnets: amorphous and nanocrystalline materials", *Acta Materialia*, Vol. 61, pp. 718-734, (2013).
- Song, H., Liu, H., Wang, Y. and Wang, G., "Microstructure and texture evolution of ultra-thin grain-oriented silicon steel sheet fabricated using strip casting and three-stage cold rolling method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 426, pp. 32-39, (2017).
- Imafuku, M., Suzuki, H., Akita, K., Iwata, K. and Fujikura, M., "Effects of laser irradiation on iron loss reduction for Fe-3%Si grain-oriented silicon steel", *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 4, pp. 939-945, (2005).
- Sato, K., Honda, A., Nakano, K., Ishida, M., Fukuda, B. and Kan, T., "Development of domain refined grain-oriented silicon steel by grooving", *Journal of Applied Physics*, Vol. 73, No. 10, 6609, (1993).
- Iuchi, T., Yamaguchi, S. and Ichiyama, T., "Laser processing for reducing core loss of grain oriented silicon steel", *Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 3, 2410, (1982).
- Inokuti, Y., "Grain oriented silicon steel sheet with a ceramic film characterized by ultra-low iron loss", *Vacuum*, Vol. 47, No. 6-8, pp. 857-862, (1996).
- Zhang Y., Gu H., Yang S. and Huang A., "Improved magnetic properties of grain-oriented silicon steel by in-situ formation of potassium zirconium phosphate in insulating coating", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 506, 166802, (2020).
- Li J., Gu Y. and Guo Z., "Decreasing the core loss of grain-oriented silicon steel by laser processing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, No. 1-3, pp. 180-185, (1997).

14. Patri, S., Gurusamy, R., Molian, P. A. and Govindaraju, M., "Magnetic domain refinement of silicon-steel laminations by laser scribing", *Journal of Materials Science*, Vol. 31, pp. 1693-1702, (1996).
15. Nesser, M., Maloberti, O., Dupuy, J., Salloum, E., Panier, S., Fortin, J. and Dassonville, P., "Correlation between laser energetic parameters and magnetic properties of GO laminations under surface treatments with long, short or ultra-short pulsed lasers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 504, 166696, (2020).
16. Takajo, S., Ito, T.; Omura, T. and Okabe, S., "Loss and noise analysis of transformer comprising grooved grain-oriented silicon steel", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 9, 2001606, (2017).
17. Ouyang, G., Chen, X., Liang, Y., Macziewski, C. and Cui, J., "Review of Fe-6.5 wt%Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 481, pp. 234-250, (2019).
18. Weidenfeller, B. and Riehemann, W. "Effects of surface treatments on the hysteresis losses of GO iron silicon steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 292, pp. 210-214, (2005).
19. Qiu, F., Ren, W., Tian, G. and Gao, B., "Characterization of applied tensile stress using domain wall dynamic behavior of grain-oriented electrical steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 432, pp. 250-259, (2017).
20. Petryshynets, I., Kovac, F., Puchy, V., Sebek, M., Fuzer, J. and Kollar, P., "Magnetic losses reduction in grain oriented silicon steel by pulse and continuous fiber laser processing", *AIP Advances*, Vol. 8, 047604, (2018).
21. Rauscher, P., Betz, B., Hauptmann, J., Wetzig, A., Beyer, E. and Grünzweig, C., "The influence of laser scribing on magnetic domain formation in grain oriented electrical steel visualized by directional neutron dark-field imaging", *Scientific Reports*, Vol. 6, Article number: 38307, (2016).
22. Cheng, L., Ma, G., Chen, X., Yang, F., Meng, L., Yang, Y., Li, G. and Dong, H., "Evolutions of microstructure and magnetic properties of heatproof domain-refined silicon steel during annealing and its application", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 514, 167264, (2020).
23. Jahangiri, M.R., Bayani, H., Ardestani, M. and Mehdizadeh, M., "Core loss reduction in grain-oriented silicon steel sheets by two-sided laser scribing in the presence of a magnetic field", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 891, 162080, (2022).
24. Shilling, J. and Houze, G., "Magnetic properties and domain structure in grain-oriented 3% Si-Fe", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 10, No. 2, pp. 195-223, (1974).
25. Hubert, O. and Daniel, L., "Multiscale modeling of the magneto-mechanical behavior of grain-oriented silicon steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, No. 7, pp. 1412-1422, (2008).
26. De Campos, M.F., Emura, M. and Landgraf, F.J.G., "Consequences of magnetic aging for iron losses in electrical steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 304, No. 2, pp. e593-e595, (2006).
27. Houze, G. L. Jr., "Domain-wall motion in grain-oriented silicon steel in cyclic magnetic fields", *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 3, pp. 1089-1095, (1967).
28. Skorvanek, I., Marcin, J., Krenicky, T., Kovac, J., Svec, P. and Janickovic, D., "Improved soft magnetic behaviour in field-annealed nanocrystalline hitperm alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 304, No. 2, pp.

203-207, (2006).

29. Perevertov, O., Thielsch, J. and Schafer, R., "Effect of applied tensile stress on the hysteresis curve and magnetic domain structure of grain-oriented transverse Fe-3%Si steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 385, pp. 358-367, (2015).

