



Identifying Carbon, Alloy and Stainless Steels based on Spark Patterns

Mahboobeh Davodabadi ^a, Mohammadreza Sheykholeslami Borghani ^{b*}, Zahra Heidari ^c, Hosein Baghizadeh ^d, Naser Meighani ^e

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran.

mahboobeh.davodi.md@gmail.com

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran. m-sheykholeslami@araku.ac.ir

m-sheykholeslami@araku.ac.ir

^c Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran.

z.heydari.mech@gmail.com

^d Raya Sanate Dana Company, Arak, Iran. rayasanatdana@gmail.com

^e KISA Company, Arak, Iran. research@kiasa.ir

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Davodabadi M, Sheykholeslami M, Heidari Z, Baghizadeh H, Meighani N. Modeling University-Industry Collaboration in Artificial Intelligence Development Through Mediating Institutions. *Industrial Innovations*. 2026; 4(2): 57-69.

 <https://doi.org/10.66224/jii.4.2.57>

KEYWORDS

Spark test;
Steel identifying;
Spark pattern analysis;
Carbon steel;
Alloy steel.

ABSTRACT

Accurate identification of steel grades is critical in industries such as oil, gas, and automotive, yet many workshops lack advanced analytical equipment. The spark test is a simple, low-cost, on-site method that offers a practical alternative. This study aims to distinguish three steel types—carbon steel A105, alloy steel 420, and stainless steel 316—based on an analysis of their spark patterns. A custom fixture with a spring mechanism was designed to apply a uniform grinding force, eliminating pressure-induced variations. The spark patterns generated by a high-speed grinding wheel were recorded by a fixed camera for further analysis. Three parameters—spark length, spread angle, and spark deviation angle—were measured after scaling in software. The results show that carbon content increases the spark spread angle and branching explosions, whereas chromium and nickel reduce the spark length and create a whitish color. Manganese intensifies yellow coloration. The measured spark lengths (after scaling) were 441 mm (316), 474 mm (A105), and 469 mm (420). The spread angles were 10.72° (316), 14.27° (A105), and 18.78° (420). These distinct patterns allow for the reliable discrimination of the three steels. The proposed fixture and quantitative parameters provide a reproducible, operator-independent spark test suitable for industrial environments.

Extended Abstract

1. Introduction

Accurate steel grade identification is crucial across various industries, including oil, gas, and automotive, because the application of an incorrect grade can cause irreparable damage [1]. While methods like X-ray fluorescence offer accuracy, they often incur high costs and require significant time. Conversely, spark testing is a non-destructive, economical, rapid, and in-situ alternative [2]. This method relies on observing the shape, color, and behavior of sparks generated when metal interacts with a grinding wheel [3-5]. The underlying mechanism of spark formation involves the

* Corresponding author.

E-mail address: m-sheykholeslami@araku.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.66224/jii.4.2.57>

Received: June 26, 2025; Received in revised form: July 25, 2025; Accepted: July 29, 2025.

Article type: Research Paper



oxidation of detached steel particles and the exothermic reaction of carbon with oxygen, resulting in sparks whose characteristics are directly affected by the material's chemical composition [6].

Conventionally, spark testing has been highly dependent on operator experience. However, recent advancements have focused on quantifying this method through image processing and machine learning. For instance, Nakata [8] quantified carbon content by analyzing the rate of explosion sparks. Nikiforov et al. [9] developed a visual identification system for eight steel grades based on branch ratios. Deng et al. [5] established a correlation between fractal dimension and carbon content. Besides, Kersher et al. [6] and Daban et al. [11] have utilized machine learning and neural network approaches. Despite achieving acceptable accuracy, these methods often necessitate extensive datasets, lengthy processing times, or a continued reliance on operator expertise. Moreover, there is a notable lack of research concerning fixture design for uniform force application and the incorporation of recycled materials.

In this study, a simple and quantitative method based on measuring three geometric parameters of the spark (length, propagation angle, deflection angle) along with the design of a spring fixture to apply a uniform force and eliminate errors caused by non-uniform pressure, is proposed. The goal is to distinguish three widely used steels—A105 (carbon), 420 (alloy), and 316 (stainless)—without the need for advanced equipment.

2. Method and materials

2-1- Equipment and experimental conditions

The experimental setup consisted of a Puka grinding wheel (model AG1803) operating at 8500 rpm and a Sony camera equipped with a 25-200 mm lens and $f/3.3-6.3$ aperture. The camera was fixed at a height of 0.6 m from the floor, with a horizontal distance of 1.17 m from its base to the fixture table. A schematic of the setup is presented in Figure 1.

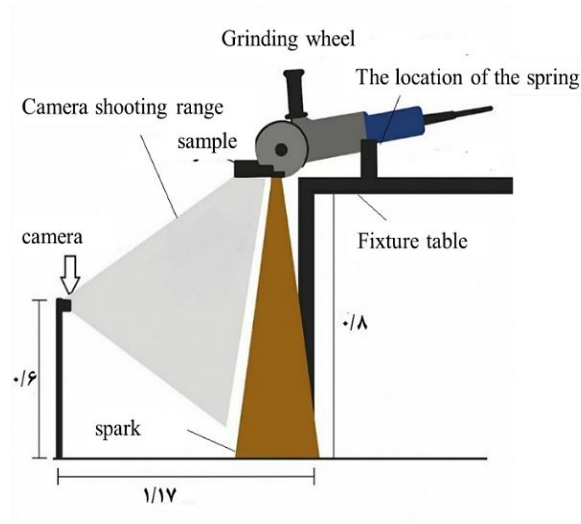


Figure 1 Schematic of how to conduct the experimental experiment and record data.

2-2-Fixture design

A spring-loaded fixture was installed to apply a uniform force. This fixture held the device's handle upward and pressed the grinding wheel against the sample with a controlled force, eliminating oscillations caused by variations in operator pressure. The experimental setup is shown in Figure 2.

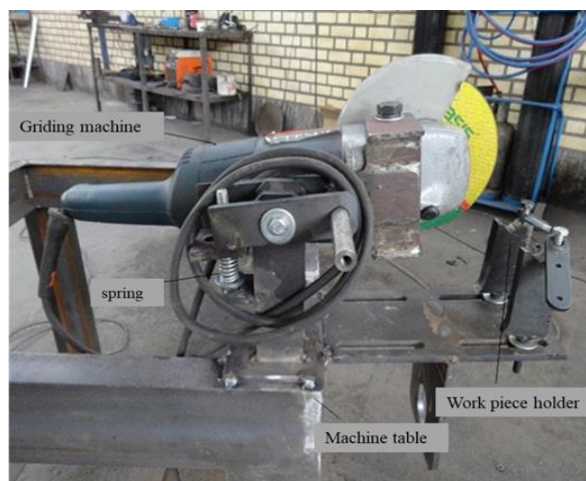


Figure 2 Experimental setup

2-3- Samples and preparation

Three types of steel containing A105 (carbon steel, 0.3–0.35% carbon, manganese), 420 (alloy steel, ~0.15–0.4% carbon, chromium), and 316 (stainless steel, ≤0.08% carbon, chromium, nickel) were studied. The chemical compositions of them are listed in Table 1 (derived from references [16–18]). Samples were prepared from scrap parts and welded to a 10–15 cm high rebar for mounting on the fixture.

Table 1 Constituent elements of the tested steels

Steel type	Carbon content	main alloying elements
316 [16]	≤ 0.08%	chromium, nickel, molybdenum
A105 [17]	~0.3-0.35%	Carbon, manganese
420 [18]	~ 0.15-0.4%	Carbon, chromium

2-4-Imaging and measurement

A dark background was chosen to enhance image contrast. Each sample was subjected to three imaging cycles to ensure repeatability. The resulting images were then imported into CATIA V5-6R2020, where spark propagation paths were meticulously traced using the integrated drawing tools. For precise dimensional calibration, a precise reference component (gutter) was used, and its actual dimension was correlated with its corresponding measurement in the image. Subsequently, three critical parameters were calculated (Figure 3): spark length, defined as the total distance traversed by the spark; propagation angle, representing the overall dispersion of the spark; and deflection or spark angle, indicating the spark's deviation from a straight axis.

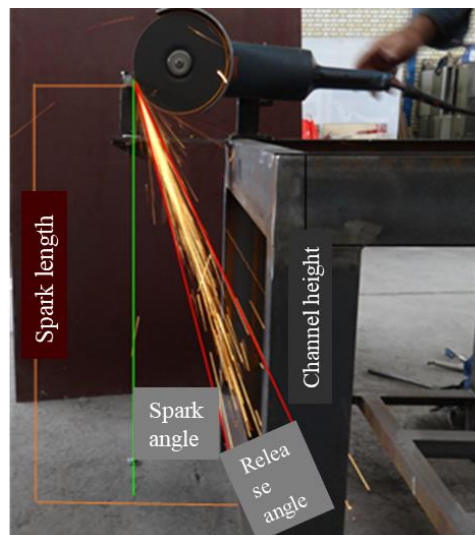


Figure 2 Measurement of spark length, spark angle, and spark propagation angle

3. Result and discussion

The average measured values after applying the scale are presented in Table 2.

Table 2 The results of spark tests

Steel type	Spark length(mm)	Spark propagation angle (degree)	Spark angle (degree)
316	441	10.72	12.44
A105	474	14.27	13.04
420	469	18.78	11.38

A105 steel, characterized by the highest carbon content, exhibits a longer spark length (474 mm) and a larger propagation angle (14.27°). This elevated carbon content promotes increased production of CO/CO₂ gas and star-shaped explosions (Figure 4-a) [8,10]. In contrast, 420 steels, with a medium carbon content, demonstrate the highest propagation angle among the three samples (18.78°).

The presence of chromium and nickel significantly influences spark characteristics. Despite its low carbon content, 316 steel exhibits the shortest spark length (441 mm) and smallest propagation angle (10.72°). This phenomenon is attributed to the

high thermal conductivity imparted by chromium (16-18%) and nickel (10-14%), which facilitates rapid dissipation of spark energy, leading to a more focused and shorter spark [9]. Furthermore, the distinctive, white-colored spectrum observed in the sparks of both 316 and 420 steels (Figures 4-b and 4-c) is indicative of the presence of chromium.

Effect of manganese: Manganese intensifies the yellow color of sparks in A105 steel [10]. Overall spark patterns: A105 produces long sparks with numerous forked branches, 420 generates scattered sparks with a white-yellow glow, and 316 produces short, uniform, and non-explosive sparks (Figure 4). These distinct patterns enable reliable differentiation of the three steels.

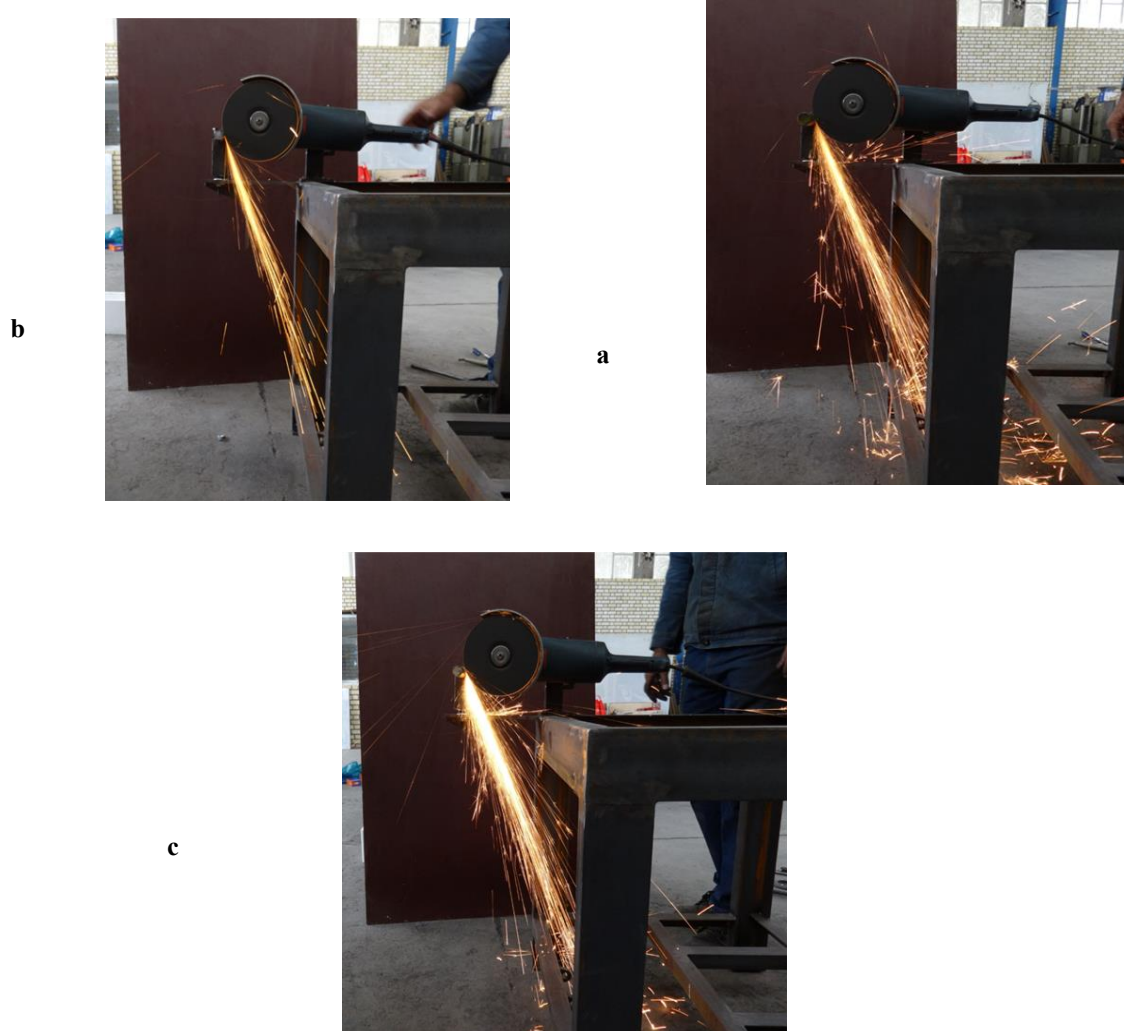


Figure 4 Sparks produced from grinding samples: (a) A105, (b) 316, (c) 420

4. Conclusion

This study presents a quantitative and practical spark testing method for identifying carbon steel (A105), alloy steel (420), and stainless steel (316). Key innovations include the extraction of three geometric spark parameters (length, propagation angle, and deflection angle) as quantitative indicators. The results demonstrated the following:

- Both the propagation angle and spark length increase with increasing carbon content. A105, possessing the highest carbon content, exhibited the longest spark (474 mm).
- Chromium and nickel reduce spark length and produce a more focused spark. Consequently, 316 steels, which contain both elements, displayed the shortest spark (441 mm).
- The spark pattern, including the presence of star-shaped explosions and white or yellow coloration, clearly distinguishes the three steel types.
- This simple, rapid, and low-cost method offers an effective tool for quality control and steel grade identification in workshops without access to advanced analytical equipment.



شناسایی فولادهای کربنی، آلیاژی و ضد زنگ براساس الگوی جرقه

محبوبه داوودآبادی^{الف}، محمدرضا شیخ‌الاسلامی بورقانی^{ب*}، زهرا حیدری^ج، حسین باقی‌زاده^د، ناصر میقانی^ه

^{الف} گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. mahboobeh.davodi.md@gmail.com

^ب گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. m-sheykholeslami@araku.ac.ir

^ج گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. z.heydari.mech@gmail.com

^د شرکت رایا صنعت دانا، اراک، ایران. rayasanatdana@gmail.com

^ه شرکت فراتوسعه کیاسا، اراک، ایران. research@kiasa.ir

واژگان کلیدی	چکیده
آزمون جرقه؛ شناسایی فولاد؛ تحلیل الگوی جرقه؛ فولاد کربنی؛ فولاد آلیاژی.	شناسایی دقیق فلزات نقش اساسی در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در کاربردهای صنعتی مختلف دارد. با این حال، بسیاری از کارگاه‌ها به دلیل محدودیت‌های منابع مالی، امکان بهره‌برداری از تجهیزات پیشرفته شناسایی فلزات را ندارند. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های ساده، سریع و کم‌هزینه مانند آزمون جرقه، می‌تواند جایگزینی مناسب و قابل اجرا باشد. آزمون جرقه بر مبنای بررسی شکل، رنگ و رفتار جرقه‌های حاصل از تماس فلز با دستگاه سنگ‌زنی نوع آلیاژ را تشخیص می‌دهد. با توجه به اهمیت این موضوع این مطالعه بر مبنای شناسایی فلزات با توجه به الگوی جرقه تولیدشده از سنگ‌زنی نمونه انجام شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله نشان داد که می‌توان فولادهایی نظیر ۳۱۶، ۴۲۰، و A105 را با تحلیل الگوهای جرقه به‌طور قابل قبولی از یکدیگر تفکیک کرد. نتایج حاکی از آن است که وجود تفاوت در ترکیب عناصر آلیاژی منجر به تولید جرقه‌هایی با ویژگی‌های متمایز می‌شود که با تجربه و دقت کافی می‌توان آن‌ها را شناسایی کرد. به‌طور مثال طول جرقه در فولاد A105 حدود ۳۳ میلی‌متر و زاویه انتشار آن ۳.۵ درجه از فولاد ۳۱۶ بیش‌تر بوده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در این مقاله، می‌توان از آزمون جرقه به‌عنوان یک روش تجربی مؤثر برای شناسایی سریع فلزات در محیط‌های صنعتی فاقد تجهیزات پیشرفته نام برد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷	

۱- مقدمه

شناسایی دقیق گرید فولادها با توجه به کاربرد گسترده و نقش اساسی این مواد مهندسی در صنایع نفت، گاز، خودروسازی و غیره دارای اهمیت ویژه‌ای است. به‌طور مثال شناسایی نادرست فولاد ۳۱۶ و استفاده از گرید نامناسب در اتصالات تحت فشار می‌تواند منجر به ایجاد خسارات فاجعه‌باری شود [۱]. این چالش عمدتاً ناشی از خطا در مستندات فروشندگان و یا نبود اطلاعات متالوژیکی کافی است. از طرفی روش‌های متداول نظیر آزمون قطره آزمون اشعه ایکس اگرچه دقیق هستند اما نیاز به هزینه و زمان بالایی برای عملکرد کامل دارند. با توجه به مقتضیات صنعت، استفاده از آزمون‌های ساده‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر برای تعیین نوع فولاد مورد استفاده ضروری است [۲].

یکی از روش‌های غیرمخرب، کم‌هزینه، ساده و قابل اجرا در محل، آزمون جرقه است. این روش که در قرن بیستم [۳] برای

مقابله با برچسب‌گذاری نادرست مواد توسعه یافت [۴]، بر اساس مشاهده الگوی جرقه‌های حاصل از تماس نمونه با چرخ سنگ‌زنی عمل می‌کند [۵]. مکانیزم تشکیل جرقه‌ها ناشی از اکسیداسیون ذرات جداشده فولاد است که در آن کربن موجود در فولاد با اکسیژن هوا واکنش داده و احتراق گرمازا ایجاد می‌کند. ذرات فولاد در اثر اصطکاک به دمای بالا رسیده و به‌صورت سطحی ذوب می‌شوند. انتشار گاز CO₂ حاصل از احتراق از این ذرات مذاب، جرقه‌ها را تشکیل می‌دهد. ویژگی‌های جرقه همانند رنگ، طول و زاویه انتشار مستقیماً به ترکیب شیمیایی فولاد وابسته است. بنابراین، استخراج الگوهای جرقه می‌تواند معیاری مؤثر برای طبقه‌بندی فولادها باشد [۶].

در رویکرد سنتی، آزمون جرقه مستلزم استفاده از چرخ سنگ‌زنی مخصوص و حضور اپراتور ماهر بود که با مقایسه الگوهای جرقه با نمونه‌های شناخته‌شده، نوع فولاد را تشخیص می‌داد. با این حال، دستیابی به نتایج دقیق و تکرارپذیر در این روش، نیازمند سال‌ها تجربه بوده است، به همین دلیل از گذشته تاکنون مطالعات متعددی برای شناسایی الگوریتم حاکم بر این روش انجام شده است [۷].

در سال‌های اخیر یکی از روش‌های تعیین محتوای کربن در مواد فولادی استفاده از روش‌های پردازش تصویر همراه با آزمون جرقه بوده است. در همین زمینه مطالعه پیشگامانه ناکاتا [۸] در سال ۲۰۱۲ نشان داد می‌توان با استفاده از پردازش تصویر، آزمون جرقه را از حالت کیفی به کمی تغییر داد. او در این مطالعه به شناسایی انواع جرقه شامل جرقه‌های انفجاری^۱ و جرقه‌های ساده^۲ ناشی از سنگ‌زنی فولادهای کربنی از ۰/۱ تا ۰/۸ درصد با استفاده از تصاویر به‌دست‌آمده، پرداخت. سپس نرخ جرقه با تقسیم تعداد جرقه‌های انفجاری بر تعداد تمام جرقه‌ها محاسبه شد. دقت گزارش شده در حدود ۰/۰۵٪ بود و نشان داد با افزایش کربن تراکم جرقه افزایش می‌یابد. با این حال اجرای دقیق روش پیشنهادی جرقه‌های انفجاری دشوار است و در این پژوهش تنها تمرکز بر درصد کربن بوده و تأثیر سایر عناصر آلیاژی بررسی نشده است همچنین تحلیل جرقه تنها بر اساس طول آن اتفاق افتاده است. نیکیفوروف و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ به ارائه یک روش کیفی برای تشخیص ۸ گرید فولاد ضد زنگ و کربنی پرداختند. مبنای تشخیص در این پژوهش مشاهده چشمی نسبت شاخه‌های جرقه به جرقه اصلی و مقایسه آن با چارت بصری بوده است. اگرچه این روش سریع بوده و نیازی به تجهیزات گران‌قیمت ندارد اما دارای محدودیت‌هایی از جمله عدم کمی‌سازی داده و وابستگی به قضاوت و مهارت اپراتور است. دنگ و همکاران [۵] به کمی‌سازی روش آزمون جرقه با استفاده از بعد فراکتالی جرقه‌ها پرداختند و نشان دادند که بعد فراکتالی جرقه‌ها هم‌بستگی خوبی با محتوای کربن دارد. این پژوهشگران محتوای کربن را در برابر بعد فراکتالی رسم کردند و منحنی به‌دست‌آمده را با استفاده از روش حداقل مربعات با یک تابع لگاریتمی طبیعی برازش کردند. نتایج نشان داد که هرچه میزان کربن بیشتر باشد، شاخه‌زنی بیشتر شده و بعد فراکتال پیچیده‌تر می‌شود. خطای اندازه‌گیری کربن در این مطالعه حدود ۰/۰۶٪ بوده است. لانگ و همکاران [۱۰] مکانیم فیزیکی و شیمیایی تشکیل جرقه را شامل جدایش ذرات، گرمایش، واکنش اکسیداسیون و انفجار گاز را بررسی کردند. آن‌ها به بررسی میزان کربن و تأثیر وجود منگنز و گوگرد در فولادهای کربنی پرداختند و نشان دادند آزمون جرقه صرفاً یک روش بصری ساده نبوده، بلکه فرایندی علمی شامل واکنش‌های حرارتی و شیمیایی پیچیده است که می‌توان از آن برای شناسایی نوع فولاد و تعیین میزان کربن آن بهره گرفت. کرشر و همکاران [۶] مطالعه‌ای را با تکنیک‌های یادگیری ماشین که شامل رگرسیون جنگل تصادفی^۳، رگرسیون بردار پشتیبان^۴، نزدیک‌ترین همسایه^۵ و بردار پشتیبان^۶ بود، برای تخمین و طبقه‌بندی محتوای کربن نمونه‌های فولادی با استفاده از تصاویر آزمون جرقه ارائه کردند. دابان و همکاران [۱۱] روشی را با استفاده از مدل‌های یادگیری انتقال VGG-16، ResNet50 و EfficientNetBo برای شناسایی انواع مختلف فلزات در طول فرایند بازیافت ارائه دادند. در واقع این روش برای طبقه‌بندی فلزات آهنی بر اساس الگوهای جرقه، به دقت ۹۸٪ در تشخیص ۷ گرید فولاد (از جمله فولادهای کربنی و زنگ‌نزن) به کار می‌رود. این روش طبقه‌بندی باعث کاهش اشتباه، صرفه‌جویی در هزینه و افزایش بهره‌وری می‌شود. با این حال، دو محدودیت کلیدی وجود

¹ Explosion spark

² Streamline spark

³ random forest regression

⁴ support vector regression

⁵ nearest neighbors

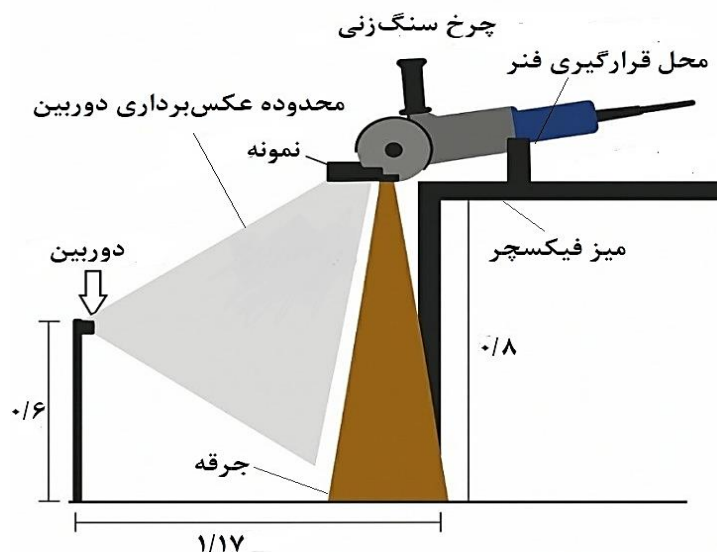
⁶ support vector machine

دارد: (۱) این روش وابسته به حجم بالای داده‌های تصویری (۲۰۰۰ تصویر به ازای هر گرید) است که جمع‌آوری آن در محیط صنعتی دشوار است و (۲) به دلیل نیاز به زمان پردازش بیش‌تر از ۵ ثانیه امکان اجرای سریع آن وجود ندارد. بنجاویلایکول و همکاران [۱۲] با استفاده از تکنیک پردازش تصویر و یادگیری ماشین یک روش آزمایش جرقه خودکار برای طبقه‌بندی فولادها توسعه دادند. در این روش طبقه‌بندی ۴ نوع فولاد کم‌کربن، متوسط کربن، پرکربن و بسیار پرکربن با استفاده از اندازه‌گیری ویژگی‌های جرقه با دقت میانگین ۹۰ درصد انجام شد. در مطالعات اخیر موتدار و همکاران [۱۳] شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) را برای تحلیل آزمایش جرقه بررسی کرده‌اند. در این پژوهش یک روش کمی و دیجیتال براساس تلفیق تصویربرداری جرقه، پردازش تصویر و یادگیری ماشین ارائه شده است. اگرچه در نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده دقت قابل‌قبولی بوده است اما کاربرد آن برای فولادهای آلیاژی دارای ترکیباتی همانند کروم نیازمند پژوهش عمیق‌تری است.

در این مقاله هدف اصلی توسعه روشی ساده و کاربردی برای شناسایی فولادهای کربنی، آلیاژی و زنگ نزن (۳۱۶، ۴۲۰ و A1۰۵) بر مبنای آزمون جرقه و بررسی کمی و کیفی جرقه ایجادشده از طریق بررسی تصاویر به‌دست‌آمده از برخورد قطعه فولادی با سنگ سمباده است. در واقع زاویه انتشار، طول و زاویه جرقه و تأثیر ترکیب شیمیایی عناصر مختلف بر این ویژگی‌ها، از جمله پارامترهای جرقه است که مورد بررسی قرار گرفته است تا یک معیار و روش ساده برای شناسایی انواع مختلف فولاد فراهم شود. از دیگر مسائل مورد بررسی در این مقاله طراحی یک فیکسچر ساده و کاربردی برای ایجاد نیروی سنگ‌زنی یکنواخت بر نمونه مورد آزمایش و حذف تغییرات جرقه ناشی از اعمال فشار سنگ‌زنی غیریکنواخت بر قطعه فولادی بوده است. نتایج بررسی‌ها نشان دادند وجود کربن بیش‌تر در نمونه‌ها باعث ایجاد جرقه بلندتر و پراکنده‌تر می‌شود به همین دلیل فولادهای کربنی با درصد کربن بالا جرقه‌هایی با طول بلندتر تولید می‌کنند. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و آشکار ترکیبات شیمیایی بر ویژگی‌های جرقه و امکان استفاده از این واقعیت برای تشخیص و شناسایی انواع فولاد است.

۲- روش تحقیق

آزمون جرقه یکی از روش‌های متداول برای شناسایی اولیه مواد آهنی و فولادی محسوب می‌شود. در این روش، نمونه فلزی عمدتاً از قراضه باقی‌مانده از قطعات فلزی اصلی انتخاب می‌شود، که خود باعث کاهش هزینه و هدر رفت ماده اولیه می‌شود. قطعه فلز انتخاب‌شده با چرخ سنگ‌زنی تماس داده می‌شود تا الگوی جرقه‌های حاصل از سایش فلز مورد بررسی قرار گیرد. این الگوها قابلیت مقایسه با نمونه‌های استاندارد یا الگوهای ثبت‌شده آزمایشگاهی را داشته و بدین‌وسیله می‌توان نوع آلیاژ را تشخیص داد. در این مقاله، جهت انجام آزمایش از یک دستگاه چرخ سنگ‌زنی، یک دوربین، فیکسچر و نرم‌افزار کتیا ورژن V5-6R2020 استفاده شد. دستگاه سنگ‌زنی مورد استفاده در این مطالعه یک چرخ از برند Puka و مدل AG1803 و ۸۵۰۰ دور بر دقیقه است. همچنین برای ثبت تصاویر، دوربینی با لنز Sony vario-tessar carl zeiss با فاصله کانونی ۲۵-۲۰ میلی‌متر و عدد دیافراگرام $f/3/3-6/3$ مورد استفاده قرار گرفت. دوربین در موقعیتی ثابت نسبت به چرخ سنگ‌زنی ثبت شد تا شرایط تصویربرداری در تمامی مراحل آزمایش یکسان باقی بماند. مطابق شکل ۱ فاصله لنز دوربین تا کف ۰/۶ متر، فاصله پایه دوربین تا میز فیکسچر ۱/۱۷ متر و فاصله میز تا کف ۰/۸ متر است.



شکل ۱ شماتیک نحوه انجام آزمایش تجربی و ثبت داده‌ها

یکی از چالش‌های اساسی در آزمون جرقه، تضمین یکنواختی نیروی اعمال شده در طول فرایند سنگ‌زنی نمونه‌های فولادی است، چرا که تغییر در نیروی اعمالی موجب نوسان در طول و شدت جرقه‌ها شده و دقت نتایج آزمون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو به منظور استانداردسازی شرایط آزمون، فیکسچری طراحی شد که بتواند نیروی ثابت و یکسانی را به تمامی نمونه‌ها وارد کند. طراحی این فیکسچر به گونه‌ای صورت گرفته است که زاویه تماس و موقعیت نمونه‌ها در مواجهه با چرخ سنگ‌زنی تغییر نکند و در تمامی آزمایش‌ها ثابت باقی بماند. برای دستیابی به این هدف، فنری در پشت دستگاه سنگ‌زنی تعبیه شده که موجب بالا نگه‌داشتن دسته دستگاه و پایین قرار دادن چرخ سنگ‌زنی می‌شود. در نتیجه نیروی یکنواخت و کنترل شده‌ای به تمام نمونه‌ها وارد شده و شرایط آزمون به صورت دقیق حفظ می‌شود. شکل ۲ فیکسچر طراحی و ساخته شده را نشان می‌دهد.



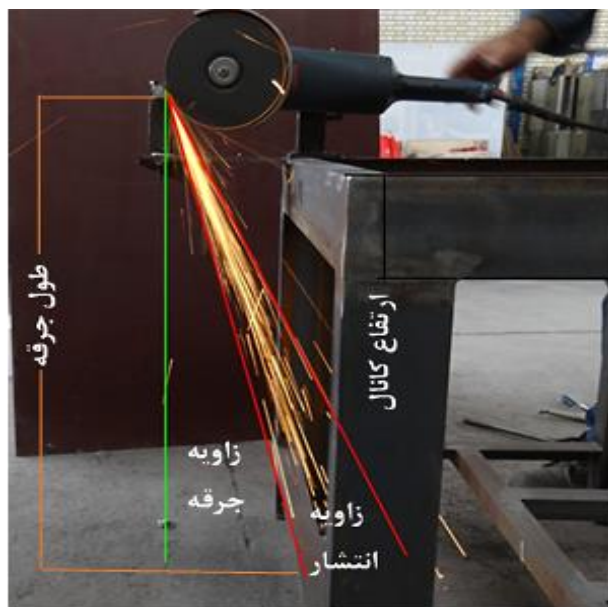
شکل ۲ مجموعه تجهیزات در آزمایش تجربی

در این مقاله، سه نوع فولاد شامل فولاد کربنی A1۰۵، فولاد آلیاژی ۴۲۰ و فولاد ضدزنگ ۳۱۶ جهت انجام آزمون جرقه انتخاب شدند. از آنجاکه ارتفاع این قطعات برای نصب مناسب بر روی بازوی فیکسچر کافی نبوده، یک میلگرد به ارتفاع حدود ۱۰

تا ۱۵ سانتی‌متر به آن‌ها جوش داده شد. با استفاده از این میلگرد نمونه‌ها به‌صورت صحیح بر روی بازو قرار گرفتند و به کمک پیچ تثبیت شدند. در نتیجه نمونه‌ها در حین عملیات سنگ‌زنی پایدار مانده و هیچ‌گونه لرزشی نداشتند. سپس نمونه‌های فولادی درون فیکسچر طراحی شده قرار گرفتند تا نیروی سنگ‌زنی به‌صورت یکنواخت اعمال شود. فرایند سنگ‌زنی توسط دستگاه چرخ سنگ‌زنی با سرعت بالا انجام شد و برای ثبت دقیق جرقه‌ها، از هر نمونه در حین آزمایش، تصویربرداری صورت گرفت.

جهت افزایش وضوح جرقه‌ها و تحلیل دقیق‌تر، زمینه تصویربرداری به رنگ تیره انتخاب شد و شرایط نوری محیط برای عکس‌برداری مناسب تنظیم شد. همچنین با توجه به این‌که هر آزمایش یک‌مرتبه برای هر نمونه انجام شده است؛ از هر نمونه سه مرتبه تصویربرداری شد تا دقت نتایج حاصل از تصاویر افزایش یابد. سپس با استفاده از ابزارهای ترسیمی در نرم‌افزار کتیا تصاویر پردازش شده، خطوط مربوط به راستای انتشار جرقه ترسیم شد. سپس با اندازه‌گیری این خطوط، طول جرقه، زاویه انتشار و زاویه آن نسبت به راستای عمود برای هر سه تصویر گرفته شده از هر نمونه محاسبه شد. شکل ۳ یک نمونه از پارامترهای اندازه‌گیری شده جرقه را نشان می‌دهد.

برای اطمینان از دقت ابعاد به‌دست‌آمده از تصاویر جرقه، مقیاس‌گذاری انجام شد. برای این منظور ابتدا ارتفاع ناودانی میز دستگاه سنگ‌زنی با کولیس اندازه‌گیری شد و بر مقدار اندازه‌گیری شده از تصاویر، به‌وسیله نرم‌افزار کتیا تقسیم شد. در ادامه این مقیاس بر مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه انتشار، طول و زاویه جرقه اعمال شد تا مقادیر واقعی این پارامترها به‌دست آید.



شکل ۳ اندازه‌گیری طول جرقه، زاویه جرقه و زاویه انتشار جرقه

۳- بحث و نتایج

همان‌طور که اشاره شد برای بررسی کامل نمونه‌های سنگ‌زنی شده، تصویربرداری از نمونه‌ها در حین آزمایش انجام شد. برای اطمینان از درستی تصاویر گرفته شده و کاهش خطای حاصل از تصویربرداری، از هر نمونه در حین انجام آزمایش سه بار تصویربرداری انجام شد. در نهایت پارامترهای زاویه جرقه، زاویه انتشار جرقه و طول جرقه برای هر یک از تصاویر به‌دست‌آمده محاسبه شد. منظور از طول جرقه طول مسیر طی شده توسط جرقه و منظور از زاویه انتشار جرقه و زاویه جرقه به ترتیب گستره زاویه‌ای که جرقه‌ها در آن منتشر می‌شوند و میزان انحراف جرقه‌ها از محور مستقیم است. میانگین نتایج محاسبات انجام شده با اعمال مقیاس به‌دست‌آمده در جدول ۱ قابل مشاهده است.

بلندترین طول جرقه مربوط به فولاد کربنی A1۰۵ و کوتاه‌ترین طول جرقه مربوط به فولاد ضد زنگ ۳۱۶ است. طول جرقه

به طور معمول با میزان انرژی آزاد شده از ماده و نیز با ترکیب آلیاژی آن مرتبط است [۱۰، ۱۴]. در جدول ۲ ترکیب عناصر تشکیل دهنده نمونه‌ها مورد آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۱ نتایج آزمون جرقه

نوع فولاد	طول جرقه (میلی‌متر)	زاویه انتشار جرقه (درجه)	زاویه جرقه (درجه)
۳۱۶	۴۴۱	۱۰.۷۲	۱۲.۴۴
A105	۴۷۴	۱۴.۲۷	۱۳.۰۴
۴۲۰	۴۶۹	۱۸/۷۸	۱۱/۳۸

فولادهایی با کربن بیشتر نظیر A105 و ۴۲۰ معمولاً جرقه‌های پراکنده‌تری تولید می‌کنند [۸]. با افزایش میزان کربن، میزان واکنش گاز کربن ایجاد شده بعد از سنگ‌زنی با اکسیژن افزایش می‌یابد و باعث تجمع گاز CO/CO₂ و در نهایت ایجاد انفجار و تولید جرقه‌هایی با انشعابات چنگالی شکل شود. همچنین وجود آلیاژی همانند منگنز این انشعابات را افزایش می‌دهد [۱۰]. این دو عامل ذکر شده باعث ایجاد بیش‌ترین شاخه‌های چنگالی شکل در فولاد A105 شده است. به علاوه وجود کربن باعث افزایش سختی، جذب انرژی بیشتر و تولید ذرات ریزتر می‌شود در نتیجه جرقه‌هایی با مسیر کوتاه‌تر ایجاد می‌شود [۱۵]. اما همان‌طور که از نتایج به دست آمده مشخص است فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با وجود کاهش محتوای کربن، برخلاف انتظار جرقه‌هایی کوتاه‌تر و با تمرکز بیشتر تولید کرده است. کاهش طول جرقه در فولاد ۳۱۶ به دلیل وجود عناصر آلیاژی کروم و نیکل است [۹] و از آنجایی درصد عنصر کروم در این فولاد نسبت به ۴۲۰ بیشتر بوده [۱۶] و به دلیل وجود عنصر نیکل کوتاه‌ترین طول جرقه مربوط به این فولاد است.

جدول ۲ عناصر تشکیل دهنده فولادهای مورد آزمایش

عناصر اصلی آلیاژی	درصد کربن	گرید فولاد
کروم، نیکل و مولیبدن	≤ ۰/۰۸٪	۳۱۶ [۱۶]
کربن و منگنز	~ ۰/۳ - ۰/۳۵	A105 [۱۷]
کربن و کروم	~ ۰/۱۵ - ۰/۴	۴۲۰ [۱۸]

میزان زاویه انتشار جرقه نیز تحت تأثیر ترکیب آلیاژی و میزان انرژی آزاد شده قرار دارد. فولادهای A105 و ۴۲۰ به دلیل محتوای بالای کربن، سخت‌تر هستند و دما و میزان انرژی بیشتری را آزاد می‌کنند [۹] که منجر به زاویه انتشار بیشتر می‌شود. در فولاد ۳۱۶ زاویه انتشار محدودتر و متمرکزتر است. در آخر با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل تصاویر هرچه میزان کربن بیشتر باشد، زاویه انحراف جرقه‌ها از محور بیشتر است و این موضوع در فولادهای ۴۲۰ و A105 قابل مشاهده است.

بررسی الگوی انتشار جرقه‌ها در فولادهای ۳۱۶، ۴۲۰ و A105 که در شکل ۴ نشان داده شده است، مشخص می‌کند که حجم و طول جرقه‌های ۳۱۶ نسبت به دو فولاد دیگر کمتر است و همین‌طور هیچ‌گونه انفجاری در ۳۱۶ دیده نشد که نشان دهنده وجود کربن کم‌تر در فولاد ۳۱۶ است. در حالی که در دو فولاد ۴۲۰ و A105 جرقه‌هایی با درخشش زیاد همراه با انفجارهای ستاره‌ای مشاهده شد که به دلیل وجود کربن بیشتر در این نمونه‌ها اتفاق افتاده است و این موضوع به خوبی مؤید تأثیر درصد کربن فولادها بر شکل جرقه و ایجاد الگوهای جرقه‌ای همراه با انفجارهای ستاره‌ای است. این پدیده به این دلیل است که درصد کربن اصلی‌ترین عامل ایجاد جرقه‌های انفجارگونه و ایجاد الگوهای شاخه‌دار است [۱۰].

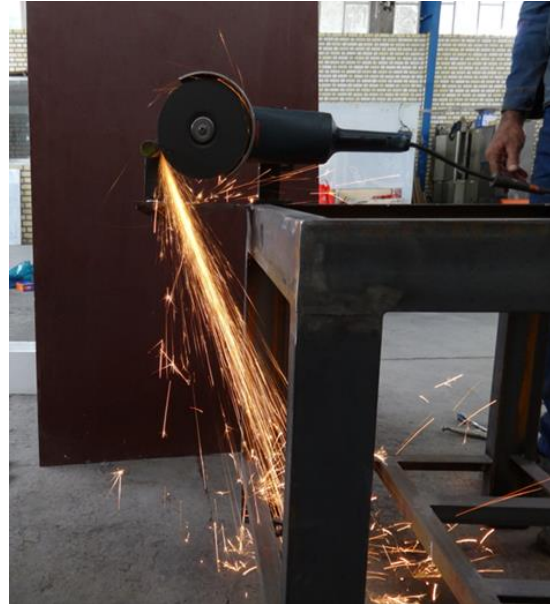
همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است شدت جرقه‌های تولید شده در فولاد ۴۲۰ از بین باقی‌گرفته‌های فولاد بررسی شده، بیشترین مقدار است. همچنین وجود طیف سفید رنگ در دو نمونه فولادی ۴۲۰ و ۳۱۶ نیز به دلیل وجود کروم در این نمونه‌ها است. در مقابل وجود عنصر نیکل با افزایش رسانایی گرمایی و انتقال حرارت بیش‌تر و سریع‌تر باعث تولید جرقه‌های کوتاه‌تر می‌شود [۹] این موضوع با قرار گرفتن در کنار کم‌ترین درصد کربن در فولاد ۳۱۶ باعث ایجاد یکنواخت‌ترین جرقه‌ها، کم‌ترین پخش جرقه و کوتاه‌ترین طول جرقه در این فولاد شده است.

در مجموع، نوع و ترکیب شیمیایی فولادها تأثیر مستقیمی بر روی ویژگی‌های جرقه تولید شده دارد. پس وجود کربن نقش

اصلی در شدت، طول و انرژی جرقه دارد. کروم رنگ را به سمت سفید می‌برد. کروم و نیکل باعث آرامش جرقه و کاهش پخش آن می‌شود. منگنز شدت رنگ زرد را تقویت می‌کند. وجود طیف زرد رنگ در جرقه‌های حاصل از سنگ‌زنی فولاد A105 به دلیل وجود عنصر منگنز در این نمونه است. یافته‌های کلیدی حاصل از آزمایشات انجام‌شده به‌خوبی نشان‌دهنده تأثیر عناصر تشکیل‌دهنده فولادها بر الگوی جرقه‌های تولیدشده حاصل از سنگ‌زنی است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴ جرقه‌های تولیدشده از سنگ‌زنی نمونه‌های فولادی (الف) A105، (ب) ۳۱۶ و (ج) ۴۲۰

۴- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر، با هدف استفاده از آزمون جرقه به‌عنوان روشی ساده، سریع و قابل انجام در اکثر محیط‌های صنعتی برای شناسایی فولاد کربنی A105، فولاد آلیاژی ۴۲۰ و فولاد ضدزنگ ۳۱۶، ارائه یک الگوریتم با استفاده از تعریف یک الگوی کمی و کیفی، انجام شد. محورهای اصلی این مطالعه بررسی الگوی جرقه ایجادشده و محاسبه سه پارامتر طول جرقه، زاویه انتشار و

زاویه انحراف جرقه بوده است. همچنین از ویژگی‌های مهم این مقاله طراحی یک فیسکچر برای اعمال یکنواخت نیرو و رفع چالش تغییر جرقه به دلیل تغییر فشار اعمالی از طریق سنگ ساینده است. یافته‌های حاصل از آزمایش به خوبی تأثیر مستقیم عناصر تشکیل‌دهنده فولادها را بر الگوی جرقه تولیدشده نشان دادند. با توجه به آزمون جرقه سه فولاد مورد آزمایش مشخص شد افزایش درصد کربن باعث ایجاد جرقه‌هایی با زاویه بیش‌تر و انفجارهای ستاره‌ای شکل می‌شود. همچنین وجود عنصر کروم و نیکل باعث کاهش طول جرقه می‌شود به طوری که افزایش حدود ۲ درصدی عنصر کروم در فولاد ۳۱۶ و اضافه شدن مقداری نیکل نسبت به فولاد ۴۲۰ باعث کاهش ۲۸ میلی‌متری طول جرقه شده است. همچنین وجود این عناصر در فولاد ۳۱۶ با کوتاه‌ترین طول جرقه ۳۳ میلی‌متری طول جرقه نسبت به فولاد A105 شده است که فاقد این عناصر بوده و دارای بلندترین طول جرقه است. همچنین وجود عنصر کروم باعث ایجاد رنگ سفید در جرقه می‌شود. درنهایت وجود عنصر منگنر باعث ایجاد رنگ زرد در جرقه‌ها شده است.

۵- مراجع

- [1] Stefanescu DM, Davis J, Destefani J. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM Int. 1990.
- [2] Oberg E, Jones F, Horton H, Ryffel H, McCauley C. Machinery's Handbook 30th Edition. Industrial Press, South Norwalk, CT; 2016.
- [3] Dalke T, Brink J, Weller M. Material determination using spark observation. Global Journal of Engineering Education. 2013;15:165-70.
- [4] RAWANI KH, PAINJANE SV, SALUNKHE AP, PATIL SS, Dharmarao S. Experimental analysis & determination of various plain carbon steels by using spark testing. JournalNX. 2017;3:123-8.
- [5] Deng K, Pan D, Li X, Yin F. Spark testing to measure carbon content in carbon steels based on fractal box counting. Measurement. 2019;133:77-80.
- [6] Kerscher PJP, Schmith J, Martins EA, de Figueiredo RM, Keller AL. Steel type determination by spark test image processing with machine learning. Measurement. 2022;187:110361.
- [7] Goodey D, Brink J. Material Determination Using a Thermal Imaging Camera. World Trans Eng Technol Educ. 2015;13:296-301.
- [8] Nakata T. Development of automated spark testing technique by image processing to measure carbon content in steel materials. IFAC Proceedings Volumes. 2012;45:118-9.
- [9] Nikiforov I, Maltsev P, Ivanov V, Barsuk I. Explanation of the express method of the determination of steel grade by spark. ENVIRONMENT TECHNOLOGIES RESOURCES Proceedings of the International Scientific and Practical Conference 2015. p. 157-61.
- [10] Long J, Li X, Pan D, Peng D. Study on the Mechanism of Carbon Steel Sparks. Journal of Testing and Evaluation. 2020;48:613-23.
- [11] Daban A, Aris SAM, Anuar MSM. Ferrous Metal Classifications Based on Sparks Pattern Using CNN Pretrained Models. 2023 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI): IEEE; 2023. p. 31-5.
- [12] Benjawilaikul T, Kaewwichit T. Classification of carbon steels by automated spark test technique using feature extraction based on machine learning image processing. The Journal of Industrial Technology. 2022;18:203-16.
- [13] Mundar G, Kovačić M, Župerl U. A Machine Vision Approach to Assessing Steel Properties through Spark Imaging. Tehnički glasnik. 2025;19:77-81.
- [14] Steel W. The Basics on the Spark Test for Steel and Other Metals.
- [15] Samuels LE. Metallographic polishing by mechanical methods: Asm International, 2003.
- [16] International A. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications 912. ASTM A240/A240M-22A: ASTM International.
- [17] International A. Standard Specification for Carbon Steel Forgings for Piping Applications. ASTM A105/A105M: ASTM International.

[18] International A. Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. ASTM A276/A276M-17: ASTM A276/A276M-17.