



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

<https://jmme.um.ac.ir>



Iron & Steel
Society of Iran

Investigation on Compressional Properties and Hardness of Tungsten Carbide-Reinforced Steels

Research Article

Hadi Nasiri¹, Hamid Sazegaran² , Ali Mohammad Naserian-Nik³

DOI: [10.22067/jmme.2025.90424.1163](https://doi.org/10.22067/jmme.2025.90424.1163)

1. Introduction

Steels are versatile engineering alloys widely used in industrial applications due to their adaptable mechanical properties. The introduction of ceramic reinforcements like tungsten carbide (WC) via powder metallurgy (PM) offers a promising route to enhance steel performance while avoiding melting-related defects. Prior studies have explored WC reinforcement in high concentrations (>10 wt.%), however, the effects of low WC additions (<4 wt.%) on compressional behavior remain unclear. This research addresses this gap by investigating how trace WC additions (0–4 wt.%) influence density, porosity, microstructure, hardness, and compressive properties of PM-processed steels. The study aims to identify the optimal WC concentration that maximizes mechanical performance while mitigating agglomeration and porosity challenges.

2. Materials and Method

Iron powder (99.9% purity, 65 μm), graphite (0.5 wt.%), iron phosphide (2 wt.% for liquid-phase sintering), and WC particles (0–4 wt.%, 10 μm , 99% purity, Fig.1) were used as raw materials. Powders were mixed at 250 rpm for 30 min, compacted via a hydraulic pressing (30 tons), and sintered in an ammonia-based atmosphere (90% H_2 , 10% N_2) at 1120°C for 60 min.

Density and porosity of steel specimens were measured. The microstructure analyzed using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM; LEO 1450VP) after nital etching. In addition, Vickers hardness (20 kg load, 5 indents/specimen) and universal compressive test (Zwick Z250, 2 mm/min strain rate) were used to investigate the mechanical behavior of composite steels.

3. Results and Discussion

The density of sintered steel specimens ranged from 6927.9 to 7101.1 kg/m^3 , with porosity levels

between 17.21% and 19.41%. Increasing WC content to 2 wt.% reduced density and increased porosity due to hindered particle compaction during pressing (Fig. 2). At 4 wt.% WC, however, density increased despite higher porosity attributed to WC's intrinsic high density (15,800 kg/m^3) compared to the steel matrix (7850 kg/m^3).

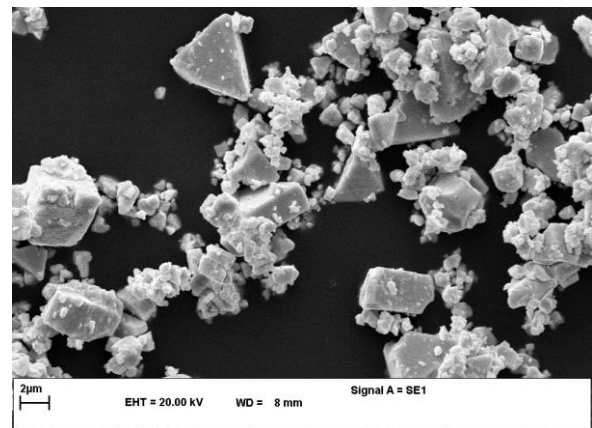


Fig 1- SEM micrograph of WC particles.

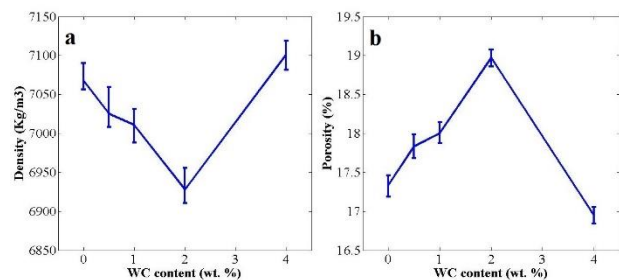


Fig 2- a) density and b) porosity of sintered specimens.

Microstructural studies confirmed polygonal ferrite and pearlite phases in all specimens. While WC

* Manuscript received: 2024 October 23, Revised 2024 December 10, Accepted 2025 September 6.

¹ Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanics and Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

² Corresponding authors: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran: **Email:** h.sazegaran@qiet.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

particles were uniformly distributed at ≤ 2 wt.%, severe agglomeration occurred at 4 wt.%, observable in SEM micrographs (Fig. 3). These clusters exhibited interfacial pores at particle-matrix boundaries, indicating weak bonding and potential stress-concentration sites. Mechanically, Vickers hardness increased by up to 30% (peak: 442 HV at 2 wt.% WC), attributable to WC particles obstructing dislocation motion and plastic deformation. At 4 wt.% WC, hardness enhancement dropped to 17% above unreinforced steel (Fig. 4). Compressive stress-strain curves revealed concurrent increases in the elastic modulus, yield strength, and compressive strength up to 2 wt.% WC, followed by reductions at 4 wt.% (Fig. 5). This decline correlated with particle clustering, non-uniform distribution, and interfacial porosity, which promoted stress concentration and crack initiation. Fracture strain and energy absorption decreased progressively with WC content, reflecting reduced ductility and toughness. This contrasts with cast WC/steel composites where liquid-phase wetting improves interfacial cohesion and simultaneous strength-toughness enhancement.

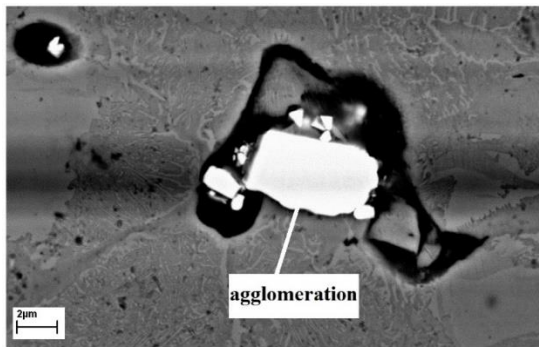


Fig 3- Agglomeration of WC particles.

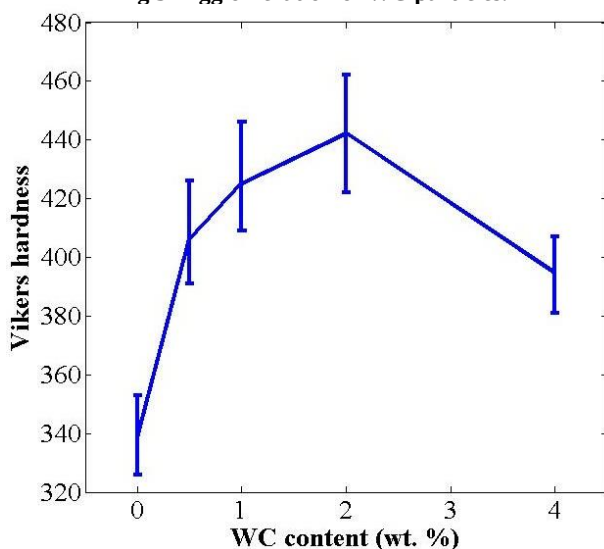


Fig 4- Vickers hardness of sintered specimens.

In conclusion, 2 wt.% WC delivered optimal mechanical performance: 30% hardness increases and 25% compressive strength gains without agglomeration defects. Higher concentrations (e.g., 4 wt.%) degraded properties due to microstructural heterogeneity, suggesting

that advanced processing (e.g., spark plasma sintering) is essential for effective high-load WC reinforcement in powder metallurgy steels.

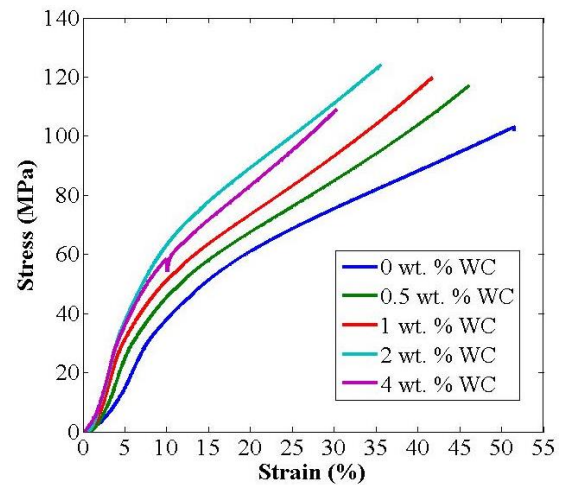


Fig 5- Stress-strain curves of composite specimens.

4- Conclusion

- 1- WC additions ≤ 2 wt.% enhance hardness (442 HV) and compressive strength via dislocation obstruction and load transfer.
- 2- At 4 wt.%, agglomeration and interfacial porosity degrade mechanical properties despite WC's high density.
- 3- Compaction and liquid-phase sintering mitigate but cannot eliminate porosity at high WC loads.



ارزیابی میزان سختی و رفتار فشاری فولادهای تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن*

مقاله پژوهشی

هادی نصیری^(۱) حمید سازگار^(۲) علی محمد ناصریان نیک^(۳)

DOI: 10.22067/jmme.2025.90424.1163

چکیده در این پژوهش، با استفاده از روش متالورژی پودر، ذرات کاربید تنگستن به عنوان تقویت کننده (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) به فولاد حاوی ۰/۵ درصد وزنی کربن اضافه شدند. شایان توجه است که ۲ درصد وزنی فسفید آهن به منظور ایجاد سازوکار تفجوشی حالت ذوبی به مخلوطهای پودری تهیه شده اضافه شد. میزان چگالی، درصد تخلخل، رفتار فشاری و میزان سختی نمونه‌های فولاد تقویت شده اندازه‌گیری گردید. در ادامه، ریزساختار فولادهای تفجوشی شده توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مطالعه شد. نتایج حاکی از آن است که میزان چگالی نمونه‌های تفجوشی شده بین ۶۹۲۷/۹ تا ۷۱۰۱/۱ kg/m³ و درصد تخلخل بین ۱۷/۲۱ تا ۱۹/۴۱ درصد است. علاوه بر این، ریزساختار نمونه‌های فولادی حاوی فریت چندوجهی و پرلیت است. در نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده درون فاز زمینه در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد. همچنین میزان سختی، ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و استحکام فشاری فولادهای تقویت شده با افزایش مقدار کاربید تنگستن تا ۲ درصد وزنی افزایش و سپس، روند کاهشی نشان می‌دهند که به تغییرات درصد تخلخل، بروز پدیده کلوخه‌ای شدن و همچنین ممانعت ذرات تقویت کننده از متراکم شدن در طی فرایند فشردن در نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن ارتباط دارد.

واژه‌های کلیدی متالورژی پودر، ذرات کاربید تنگستن، رفتار فشاری، سختی، ریزساختار.

Investigation on Compressional Properties and Hardness of WC Reinforced Steels

Hadi Nasiri Hamid Sazegaran Ali Mohammad Naserian-Nik

Abstract In this work, using the powder metallurgy method, tungsten carbide particles (0, 0.5, 1, 2, and 4 wt.%) were added as reinforcement to the steel containing 0.5 wt.% of carbon. It is worth noting that 2 wt.% of iron phosphide was added to the prepared powder mixture in order to create a liquid phase sintering mechanism. Density, porosity content, compressive properties, and hardness of reinforced specimens were experimentally examined. In addition, the microstructure of sintered steels was studied using optical and scanning electron microscopes. The obtained results indicate the density is between 6927.9 to 7101.1 kg/m³ and the porosity is between 17.21 to 19.41%. The microstructure of the steel specimens contains ferrite and pearlite. In the specimen containing 4 wt.% of tungsten carbide, the agglomeration of reinforcing particles in the steel matrix was observed in the SEM micrographs. Also, it can be seen, the hardness, elasticity coefficient, yield strength and compressive strength of reinforced steels increased by adding the amount of tungsten carbide up to 2 wt.%. After that the mentioned properties showed a decreasing trend, which is due to changes in the percentage of porosity and occurrence of agglomeration phenomenon. Another reason for such effect is the prevention of reinforcement particles from condensing during the compression process for specimen with 4 wt.% of tungsten carbide.

Keywords Powder metallurgy, WC particles, Compressional properties, Hardness, Microstructure.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۶/۱۵ می‌باشد.

(۱) استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند.

Email: h.sazegaran@qiet.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان.

(۳) استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان.

مقدمه

فولادها دسته‌ای از آلیاژهای مهندسی هستند که به دلیل داشتن ویژگی‌های جالب توجه و منحصر به فرد قابلیت به کار گرفته شدن در صنایع مختلف را دارند [1]. میزان کربن، افزودن سایر عناصر آلیاژی، نحوه فولادسازی، فرایندهای متنوع تولید و نوع عملیات حرارتی نهایی از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رفتار مکانیکی فولادهای صنعتی هستند [2,3]. در این میان، فرایند تولید می‌تواند تأثیر فراوانی بر روی ریزساختار و در نتیجه، ویژگی‌های مکانیکی و همچنین مشخصه‌های عملکردی فولادها در شرایط کاری گوناگون داشته باشد [4,5]. شایان توجه است که با تغییر عوامل تولید می‌توان به بهینه ویژگی‌های مکانیکی محصولات فولادی دست یافت. افزودن ذرات تقویت کننده و تولید مواد مرکب زمینه فولادی با تقویت کننده ذره‌ای یکی از شیوه‌های ارتقای ویژگی‌های مکانیکی فولادهاست [6,7]. هر چند که عناصر آلیاژی و ریزساختار زمینه در مواد مرکب زمینه فولادی حائز اهمیت هستند، اما ویژگی‌های مکانیکی شدیداً تحت تأثیر اندازه، شکل، توزیع و جنس ذرات تقویت کننده است [8].

فرایندهای تولید مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات به دو دسته کلی متالورژی ذوبی و متالورژی پودر دسته‌بندی می‌شود که روش متالورژی پودر به علت سهولت در اختلاط، توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات و همچنین عدم بروز مشکلات ناشی از ایجاد مذاب (همانند تشکیل اکسیدها و انحلال گازها) بسیار پُر کاربرد است. در روش متالورژی پودر، ذرات تقویت کننده اغلب به مخلوط پودرهای آهن به همراه سایر عناصر آلیاژی و یا به پودرهای پیش‌آلیاژی افزوده می‌شوند و توزیع یکنواخت این ذرات در حین فرایند اختلاط می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی همسانگرد را بعد از فرایند تفجوشی در قطعات تولیدی به ارمغان بیاورد [9]. ذرات مختلفی به عنوان تقویت کننده در تولید مواد مرکب زمینه فولادی به کار گرفته می‌شوند که مهم‌ترین مشخصه آن‌ها سختی بالا است. اغلب کاربید تیتانیوم [10,11]، کاربید سیلیسیم [12]، نیتريد سیلیسیم [13] و کاربید تنگستن [14,15] به عنوان ذرات تقویت کننده در مواد مرکب زمینه فولادی به کار گرفته می‌شوند و دارای سختی نسبتاً بالایی هستند.

در مطالعه دنگ و همکارش [16]، فولاد زنگ‌نزن تقویت شده با کاربید تنگستن با استفاده از نورد و تفجوشی تولید شده است و نتایج نشان می‌دهد که عوامل تولید و مقدار کاربید تنگستن بر روی ویژگی‌های مکانیکی مؤثر است. بهترین رفتار

کششی در نمونه تفجوشی شده در دمای 1200°C با ۳۵ درصد نورد که حاوی ۱۰ درصد وزنی کاربید تنگستن می‌باشد، گزارش شده است. در روش رسوب‌دهی مستقیم با انرژی، تا حدود ۵۰ درصد وزنی کاربید تنگستن در ریزساختار پوشش ایجاد شده بر روی فولاد ابزار گرم‌کار کروم‌دار H13 مشاهده شده است که بهینه عملکرد این پوشش در ۴۰ درصد وزنی کاربید تنگستن می‌باشد [17]. نتایج لیو و همکارانش [18] حاکی از آن است که افزودن کاربید تنگستن به شدت سبب بهبود میزان سختی و مقاومت به سایش فولاد AISI 1045 شده است. علاوه بر این، در مقادیر بالای کاربید تنگستن (بیشتر از ۲۰ درصد وزنی)، تشکیل فاز $(\text{Fe,W})_6\text{C}$ در مواد مرکب زمینه فولادی تولید شده به روش ساخت افزایشی گزارش شده است و با افزایش درصد وزنی کاربید تنگستن، شکست ترد رخ می‌دهد [18].

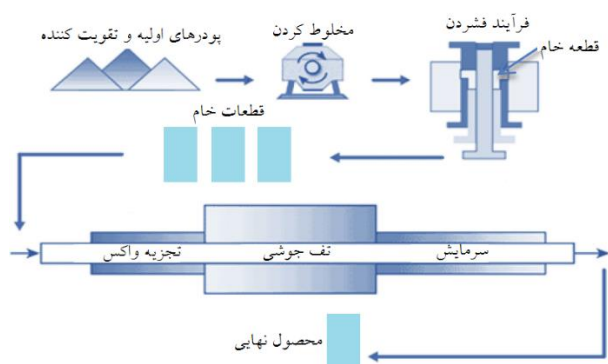
بهبود استحکام و چقرمگی به صورت توأمان در فولادهای تقویت شده با کاربید تنگستن که به روش فلزخورانی و نفوذ فاز جامد به صورت درجا تولید شده‌اند، توسط بای و همکارانش [19] نشان داده شده است. قابل ذکر است که افزودن عناصر خاکی کمیاب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی ریزساختار فولاد تقویت شده با کاربید تنگستن تولید شده به روش متالورژی پودر و تفجوشی شده در خلأ ندارد. این در حالی است که بهبود ویژگی‌های مکانیکی با افزودن عناصر خاکی کمیاب مشاهده شده است [20]. هر چند مطالعات فراوانی بر روی مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن که به روش‌های متنوعی تولید شده‌اند، صورت گرفته است [21-24]، اما تأثیر مقادیر نسبتاً پایین کاربید تنگستن (کمتر از ۴ درصد وزنی) بر روی رفتار مکانیکی فولاد تولید شده به روش متالورژی پودر مطالعه نشده است. هدف اصلی این پژوهش، تولید و ارزیابی میزان تخلخل، ریزساختار، رفتار فشاری و میزان سختی فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) است.

مواد و روش انجام آزمون‌ها

مواد و فرایند تولید

به منظور تولید نمونه‌های فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن از پودرهای آهن (تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد، با میزان خلوص ۹۹/۹ درصد و میانگین ذرات ۶۵ میکرون)، کربن (۰/۵ درصد وزنی)، فسفید آهن (۲ درصد وزنی) به منظور ایجاد یک فاز یوتکتیک مذاب در دمای فرایند

استفاده برای فشرده‌سازی از جنس فولاد ابزار گرم‌کار H13 هستند که فرایند فشردن را از دو طرف انجام می‌دهند. شایان توجه است که فشردن از دو طرف از بروز پدیده پافیلی در نمونه‌های اولیه ممانعت می‌کند. در ادامه، نمونه‌های خام تولید شده با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر به منظور انجام فرایند تف‌جوشی درون یک کوره تونلی سه مرحله‌ای قرار داده شدند. در مرحله اول، خروج واکس (همان استئارات روی) در دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۳۵ دقیقه صورت گرفت. در مرحله دوم، تف‌جوشی در دمای ۱۱۲۰ °C و در مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. در آخرین مرحله، فرایند سرد شدن تا دمای محیط در مدت ۲۵۰ دقیقه به تدریج صورت گرفت. قابل توجه است که محیط کوره، آمونیاک شکسته است و مقداری هیدروژن به آن اضافه می‌شود تا اتمسفر کوره به ترکیب شیمیایی ۹۰ درصد حجمی هیدروژن و ۱۰ درصد حجمی نیتروژن برسد. مراحل تولید نمونه‌ها به روش متالورژی پودر در شکل (۲) به صورت شماتیک نشان داده شده است.

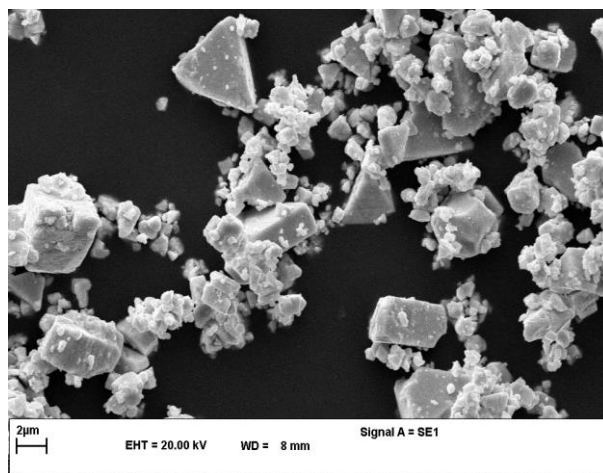


شکل ۲ نمایش شماتیک شیوه تولید مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن

تعیین چگالی و درصد تخلخل

عملیات پلیسه‌گیری بعد از فرایند تف‌جوشی بر روی نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن درون یک محفظه استوانه‌ای دوار با سرعت چرخش ۱۵۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه که حاوی گوه‌های پلیسه‌گیر است، صورت گرفت. شایان توجه است که انجام این عملیات تأثیری بر روی ابعاد نمونه‌های تولیدی ندارد. در نهایت، نمونه‌هایی با قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۸ میلی‌متر توسط برش با دستگاه وایرکات (DK7735) تهیه گردید. مقدار چگالی و درصد تخلخل نمونه‌های تولیدی به روش

تف‌جوشی و تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد، با میزان خلوص ۹۸ درصد و میانگین ذرات ۲۵ میکرون) و کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی به عنوان تقویت‌کننده سرامیکی و تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد، با میزان خلوص ۹۹ درصد و میانگین ذرات ۱۰ میکرون) استفاده شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات کاربید تنگستن به عنوان تقویت‌کننده سخت و مستحکم در شکل (۲) نشان داده شده است. علاوه بر این، ۱ درصد وزنی استئارات روی به عنوان روان‌کار حالت جامد به همه مخلوط‌های پودری اضافه شد تا سبب تراکم‌پذیری بیشتر مخلوط‌های پودری در طی مرحله فشردن شود [25]. باید در نظر داشت که پودرهای مورد استفاده از شرکت متالورژی پودر خراسان تهیه شدند. پودرهای تهیه شده بعد از توزین توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم، با یک مخلوط‌کن مخصوص متالورژی پودر با سرعت چرخش rpm ۲۵۰ و به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شدند و توزیع کاملاً یکنواخت ذرات پودری حاصل شد. بر اساس مقدار کاربید تنگستن اضافه شده به مخلوط‌های پودری، پنج نوع مخلوط پودری تهیه شد که تفاوت آن‌ها فقط در مقدار کاربید تنگستن افزوده شده است.



شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات کاربید تنگستن مورد استفاده به عنوان تقویت‌کننده

پس از انجام فرایند اختلاط و تهیه مخلوط‌های پودری، فرایند فشرده‌سازی توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک دو طرفه (۳۰ تُن) و درون یک قالب از جنس فولاد زنگ‌نزن 316L صورت گرفت. قالب مورد استفاده دارای یک حفره استوانه‌ای شکل با طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۲ میلی‌متر است و سمبه‌های مورد

شدند. نیروی اعمالی در این آزمون برابر ۲۰ کیلوگرم انتخاب شد و نتایج بر اساس میانگین ۵ اندازه‌گیری ارائه گردید. آزمون فشار یونیورسال توسط دستگاه Zwick مدل Z250 بر روی نمونه‌های برش داده شده با قطر ۱۲ mm و ارتفاع ۱۸ mm صورت گرفت و نتایج بر اساس میانگین ۳ آزمون ارائه شد. سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر ۲ mm/min انتخاب گردید. به منظور کاهش اصطکاک و همچنین کاهش تشکیل نواحی مرده، روان‌کاری بین فک و نمونه‌ها توسط روغن مخصوص صورت گرفت. قابل ذکر است که سطوح نمونه‌ها که توسط وایرکات برش داده شده‌اند، کاملاً مسطح است. این در حالی است که سطوح همه نمونه‌های مرکب قبل از انجام آزمون سختی‌سنجی پولیش شد تا میزان خطای اندازه‌گیری کاهش یابد.

نتایج و بحث چگالی و تخلخل

همان طور که می‌دانیم، میزان چگالی (و یا به صورت معکوس درصد تخلخل) تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار مکانیکی قطعات فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر دارد [27,28]. این قبلاً مشاهده شده است که علاوه بر ترکیب شیمیایی آلیاژ، درصد تخلخل نیز بر روی دگرگونی‌های فازی و همچنین بر روی رفتار مکانیکی فولادهای تولید شده به روش متالورژی پودر مؤثر است [29]. در شکل (۳) میزان چگالی و درصد تخلخل مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میزان چگالی بین ۶۹۲۷/۹ تا ۷۱۰۱/۱ kg/m³ و درصد تخلخل بین ۱۷/۲۱ تا ۱۹/۴۱ درصد اندازه‌گیری شده است. مطابق با شکل، میزان چگالی نمونه‌های تف‌جوشی شده تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش پیدا می‌کند و به تبعیت از آن، درصد تخلخل آن‌ها افزایش نشان می‌دهد. احتمالاً کاهش میزان چگالی و افزایش درصد تخلخل به اثر ذرات کاربید تنگستن بر روی ممانعت از متراکم شدن ذرات آهن در مرحله فشردن ارتباط پیدا می‌کند [30].

اندازه‌گیری ابعادی و توزین (توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم) تعیین شد. از رابطه (۱) برای تعیین مقدار چگالی و از رابطه (۲) برای تعیین درصد تخلخل استفاده شد [26]. باید در نظر داشت که برای تعیین درصد تخلخل نمونه‌های تف‌جوشی شده، چگالی جامد (همان چگالی فولاد کاملاً متراکم) برابر ۷/۸۵ g/cm³ در نظر گرفته شده است.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$$P = \left[1 - \left(\frac{\rho_{PM}}{\rho_S} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

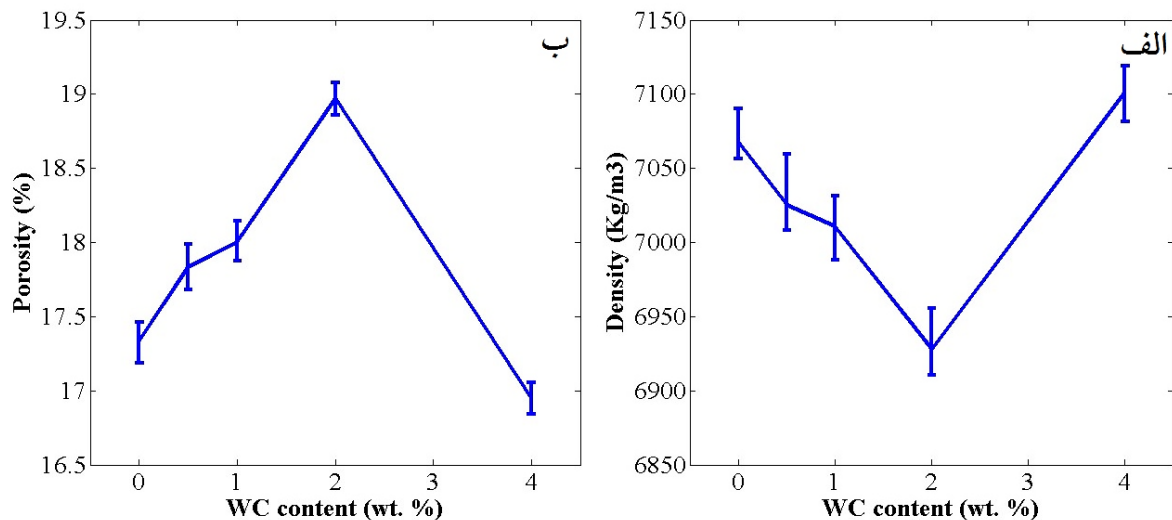
که در روابط فوق، ρ میزان چگالی، m جرم، V حجم، P درصد تخلخل، ρ_{PM} چگالی قطعه فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر و ρ_S چگالی جامد یا چگالی فولاد کاملاً متراکم است.

مطالعات میکروسکوپی

برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن و همچنین ارزیابی و مشاهده فازهای موجود در ریزساختار از میکروسکوپ نوری (LM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM مدل LEO 1450VP) استفاده شد. ابتدا، قطعات تف‌جوشی شده توسط دستگاه وایرکات (DK7735) در جهت عمود به محور استوانه برش داده شدند و سپس، فرایندهای مانیت گرم، سمباده‌زنی و پولیش‌کاری به ترتیب بر روی آن‌ها انجام شد. در ادامه، فرایند حکاکی (اچ) در محلول نایتال صورت گرفت. قابل ذکر است که ابتدا نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و سپس، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند. باید خاطرنشان کرد که نرم‌افزار پردازش تصویر MIP برای تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپی مورد استفاده واقع شد.

رفتار مکانیکی

برای تعیین رفتار مکانیکی مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن آزمون‌های سختی و فشار به کار گرفته شد. سختی توسط دستگاه ویکرز به کمک فرورونده الماسی هرمی شکل انجام شد. قابل ذکر است که قبل از انجام آزمون سختی‌سنجی ویکرز، سطوح نمونه‌هایی که توسط وایرکات مسطح بریده شده‌اند، کاملاً تمیز و عاری از هر گونه آلودگی



شکل ۳ (الف) میزان چگالی و (ب) درصد تخلخل نمونه‌های تف‌جوشی شده

دلیل داشتن سطوح صاف و یا باقی ماندن قسمت‌هایی از کاربید تنگستن احتمالاً به وجود ذرات کاربید تنگستن در مواد مرکب زمینه فولادی تف‌جوشی شده ارتباط دارند. باید در نظر داشت که اغلب از ذرات کاربیدی به خاطر اینکه سختی بالایی دارند، در طی فرایند سمباده‌زنی و پولیش‌کاری از محل خود جدا و خارج می‌شوند. شایان توجه است که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به دلیل بالا بودن عمق میدان، احتمال مشاهده شدن قسمتی از ذرات کنده شده در قسمت انتهایی حفرات خیلی بیشتر است.

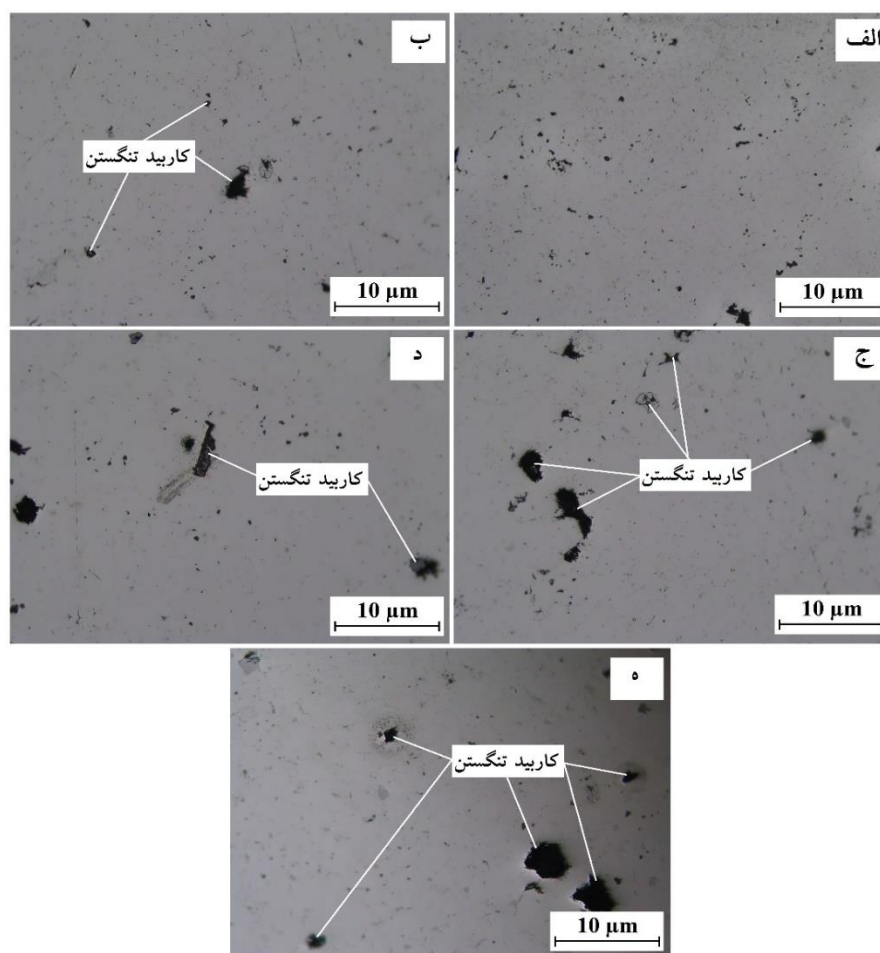
کسر سطحی نواحی سیاه رنگ در ۱۰ تصویر میکروسکوپ نوری از فولادهای حاوی مقادیر گوناگون کاربید تنگستن توسط نرم‌افزار MIP اندازه‌گیری شده است. در صورتی که مقادیر کسر سطحی به دست آمده برای نمونه‌های مختلف از کسر سطحی نواحی سیاه رنگ موجود در تصاویر نمونه بدون کاربید تنگستن کم شود، می‌توان کسر سطحی مربوط به ذرات کاربید تنگستن را به دست آورد. کسر سطحی نواحی سیاه رنگ (که توسط نرم‌افزار پردازش تصویر اندازه‌گیری شده‌اند) و کسر سطحی ذرات کاربید تنگستن (که بر اساس نتایج محاسبه شده‌اند) در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، کسر سطحی نواحی سیاه رنگ و کسر سطحی کاربید تنگستن با افزایش درصد وزنی کاربید تنگستن افزایش می‌یابد. البته باید خاطر نشان کرد که شیب نمودارها در مقادیر بالاتر از ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش می‌یابد که این نیز می‌تواند به دو عاملی که در

این در حالی است که میزان چگالی در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن افزایش چشمگیر نشان می‌دهد و به تبع آن کاهش در درصد تخلخل محاسبه شده در این نمونه رخ می‌دهد. احتمالاً این افزایش در میزان چگالی و کاهش در درصد تخلخل به بالا بودن چگالی کاربید تنگستن (15800 kg/m^3) در مقایسه با چگالی فولاد (7850 kg/m^3) مرتبط می‌گردد. بنابراین می‌توان بیان کرد که دو عامل مؤثر بر روی میزان چگالی و درصد تخلخل فولادهای تولید شده به روش متالورژی پودر که توسط ذرات کاربید تنگستن تقویت شده‌اند، شامل میزان اثرگذاری ذرات تقویت کننده بر روی متراکم شدن در مرحله فشردن و میزان چگالی ذرات تقویت کننده است. بر این اساس، عامل اول تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن نسبت به عامل دوم تأثیر بیشتری دارد و در نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، عامل دوم اثر بیشتری از خود نشان می‌دهد.

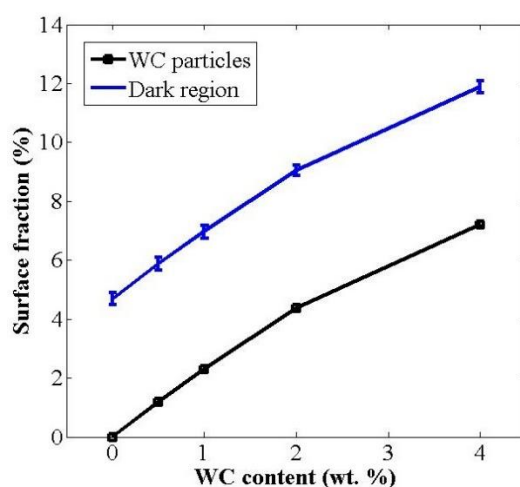
ریزساختار

در شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از انجام فرایند حکاکی بر روی نمونه‌های فولادی حاوی مقادیر مختلف کاربید تنگستن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در فولاد بدون کاربید تنگستن نیز نواحی سیاه رنگ مشاهده می‌شود که به تشکیل حفرات در میان ذرات آهن تف‌جوشی شده به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کند [31,32]. در سایر تصاویر علاوه بر این نواحی، نواحی سیاه رنگ دیگری نیز مشاهده می‌شوند که به

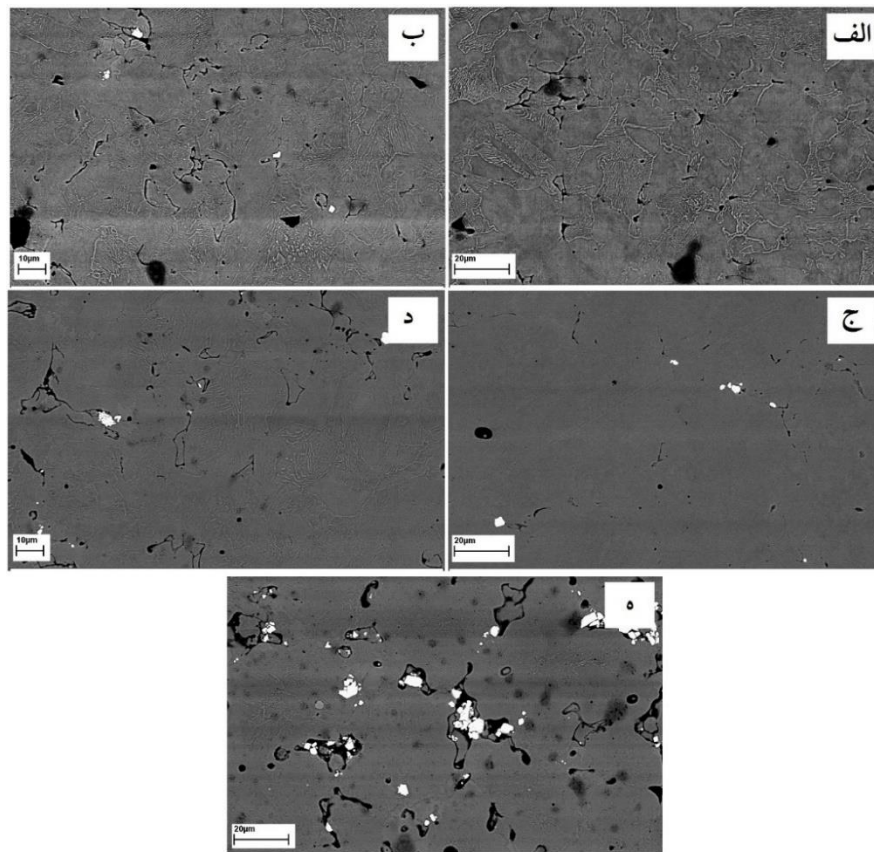
بخش قبل بررسی شد، یعنی اثر کاربید تنگستن بر ممانعت از متراکم شدن در مرحله فشردن و اختلاف زیاد چگالی کاربید تنگستن با آهن، مربوط باشد.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از حکاکی از سطوح فولادهای حاوی (الف) ۰ درصد وزنی کاربید تنگستن، (ب) ۰/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن، (ج) ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن، (د) ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن و (ه) ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن



شکل ۵ کسر سطحی نواحی سیاه رنگ و کسر سطحی کاربید تنگستن موجود در تصاویر میکروسکوپ نوری بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن افزوده شده که توسط نرم افزار MIP پردازش شده است



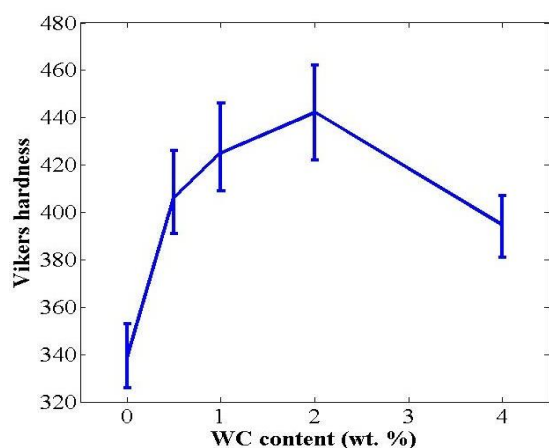
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از انجام فرایند حکاکی از سطوح فولادهای حاوی با (الف) ۰ درصد وزنی کاربید تنگستن، (ب) ۰/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن، (ج) ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن، (د) ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن و (ه) ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن

فاز فریت با ریخت چند وجهی (پلی گونال) مشاهده می شود. در اثر دگرگونی یوتکتوئید در اندکی پایین تر از دمای یوتکتوئید، فاز آستنیت به لایه های متناوب فریت و سمانتیت (یا همان پرلیت) تبدیل می گردد [35] که فریت چندوجهی و لایه های متناوب پرلیت در همه تصاویر میکروسکوپی به وضوح دیده می شود.

علاوه بر این، در نمونه های فولادی حاوی کاربید تنگستن (تا حداکثر ۲ درصد وزنی)، پراکندگی ذرات با توزیع نسبتاً یکنواخت در زمینه مشاهده می شود که اثبات می کند که فرایند اختلاط ذرات پودر با یکدیگر به صورت مناسب صورت گرفته است. توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات تقویت کننده سرامیکی می تواند سبب ارتقای ویژگی های مکانیکی ماده مرکب زمینه فولادی نهایی گردد [36]. این در حالی است که با افزایش درصد وزنی فاز تقویت کننده، امکان کلوخه ای شدن (آگلومره شدن) ذرات در زمینه وجود دارد. در نمونه های فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، پدیده کلوخه ای شدن ذرات تقویت کننده درون زمینه فولادی رخ می دهد که نمونه ای از آنچه در تصاویر

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح نمونه های فولادی حاوی مقادیر مختلف کاربید تنگستن بعد از فرایند حکاکی توسط محلول نایتال در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، ریزساختار همه نمونه ها شامل فریت و پرلیت است. خاطر نشان می گردد که مقدار گرافیت اضافه شده به مخلوط پودری مورد استفاده برای همه نمونه های فولادی تفجوشی شده برابر ۰/۵ درصد وزنی است که منبع تشکیل کاربید آهن خواهد بود. علاوه بر این، شرایط مناسب برای انجام پدیده نفوذ اتم های کربن در دمای تفجوشی (یعنی دمای °C ۱۱۲۰) فراهم است [33,34]. بنابراین، با نفوذ اتم های کربن به حفرات اکتاهدرال و تراهدرال بین نشینی در ساختار اتم های آهن در شرایط مناسب دما و زمان تفجوشی، فاز فریت که محلول جامد کربن در آهن آلفا با ساختار مکعبی مرکز پُر (BCC) است و همچنین فاز آستنیت که محلول جامد کربن در آهن گاما با ساختار مکعبی با سطوح مرکز پُر (FCC) است، تشکیل می گردد. شایان توجه است که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی،

اندازه‌گیری شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، مقادیر سختی با افزودن ذرات تقویت کننده کاربید تنگستن به زمینه فولاد افزایش قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد. البته، بهبود میزان سختی با افزودن ذرات تقویت کننده سخت (همانند کاربید سیلیسیم) به زمینه نرم فلزی (همانند آلومینیوم) قبلاً نیز گزارش شده است [39]. با افزودن ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن به ترتیب حدوداً ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۱۷ درصد بهبود در مقدار سختی نمونه‌های فولاد تقویت شده رخ می‌دهد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن، میزان سختی و یکرز افزایش می‌یابد و پس از آن، شیب افزایش سختی در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن اُفت می‌کند. البته، این در حالی است که نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن در حدود ۵۶ و یکرز در مقایسه با نمونه تقویت نشده سخت‌تر است. بهبود میزان سختی در نمونه‌های تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن احتمالاً به اثر ممانعت‌کنندگی ذرات بر روی حرکت ناب‌جایی‌ها و جلوگیری از ایجاد تغییر شکل پلاستیک ارتباط می‌یابد [40]. این در حالی است که احتمالاً پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده در فولاد حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن سبب کاهش میزان سختی در این ماده مرکب می‌گردد. باید در نظر داشت که کلوخه‌ای شدن از توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده درون زمینه فولادی ممانعت می‌کند و علاوه بر این، تشکیل حفرات در نواحی کلوخه‌ای شدن منجر به کاهش میزان سختی خواهد شد.



شکل ۸ میزان سختی و یکرز نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن افزودنی

منحنی‌های تنش - کرنش فشاری نمونه‌های فولاد تقویت شده با مقادیر مختلف کاربید تنگستن در شکل (۹) نمایش داده

میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایان شده بود، در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است. جالب توجه است که در اطراف نواحی کلوخه‌ای شده، اتصال ذرات کلوخه‌ای به زمینه فولادی بسیار ضعیف است و اغلب حفرات فراوانی در اطراف ناحیه کلوخه‌ای مشاهده می‌گردد. تشکیل چنین حفراتی در اطراف نواحی کلوخه‌ای می‌تواند تأثیر منفی چشمگیری بر روی رفتار مکانیکی و همچنین عملکرد فولاد تقویت شده داشته باشد. از طرف دیگر، این احتمال می‌رود که وجود این حفرات و بروز پدیده کلوخه‌ای شدن می‌تواند کاهش ویژگی‌های مکانیکی در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن را نتیجه دهد.

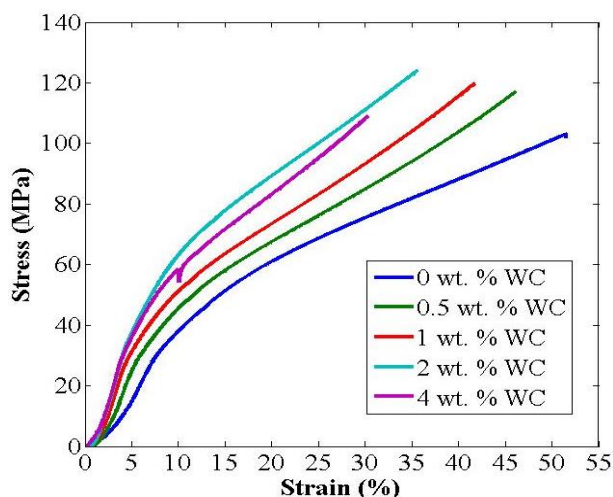


شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن که نمایش دهنده کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده در زمینه فولادی است

رفتار مکانیکی

سازوکارهای استحکام‌بخشی در فلزات و آلیاژها شامل کاهش اندازه دانه، کارسختی، افزایش سختی با عناصر آلیاژی، رسوب‌سختی، بهبود سختی با ذرات تقویت کننده یا تولید مواد مرکب، استفاده از عملیات حرارتی و دگرگونی‌های فازی است. در مواد مرکب، با وجود اینکه افزودن تقویت کننده‌های سخت به شکل ذره می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نیز مؤثر باشد [37,38]، اما اغلب بهبود رفتار مکانیکی محصول نهایی هدف غایی است. در پژوهش حاضر، میزان سختی و رفتار فشاری نمونه‌های فولادی تقویت شده با مقادیر مختلف ذرات کاربید تنگستن ارزیابی شده است. در شکل (۸) اثر افزودن ذرات کاربید تنگستن بر روی میزان سختی و یکرز نمونه‌های فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر به تصویر کشیده شده است. میزان سختی و یکرز نمونه‌های تولید شده بین ۳۳۸/۶۶ و ۴۴۲/۳۳

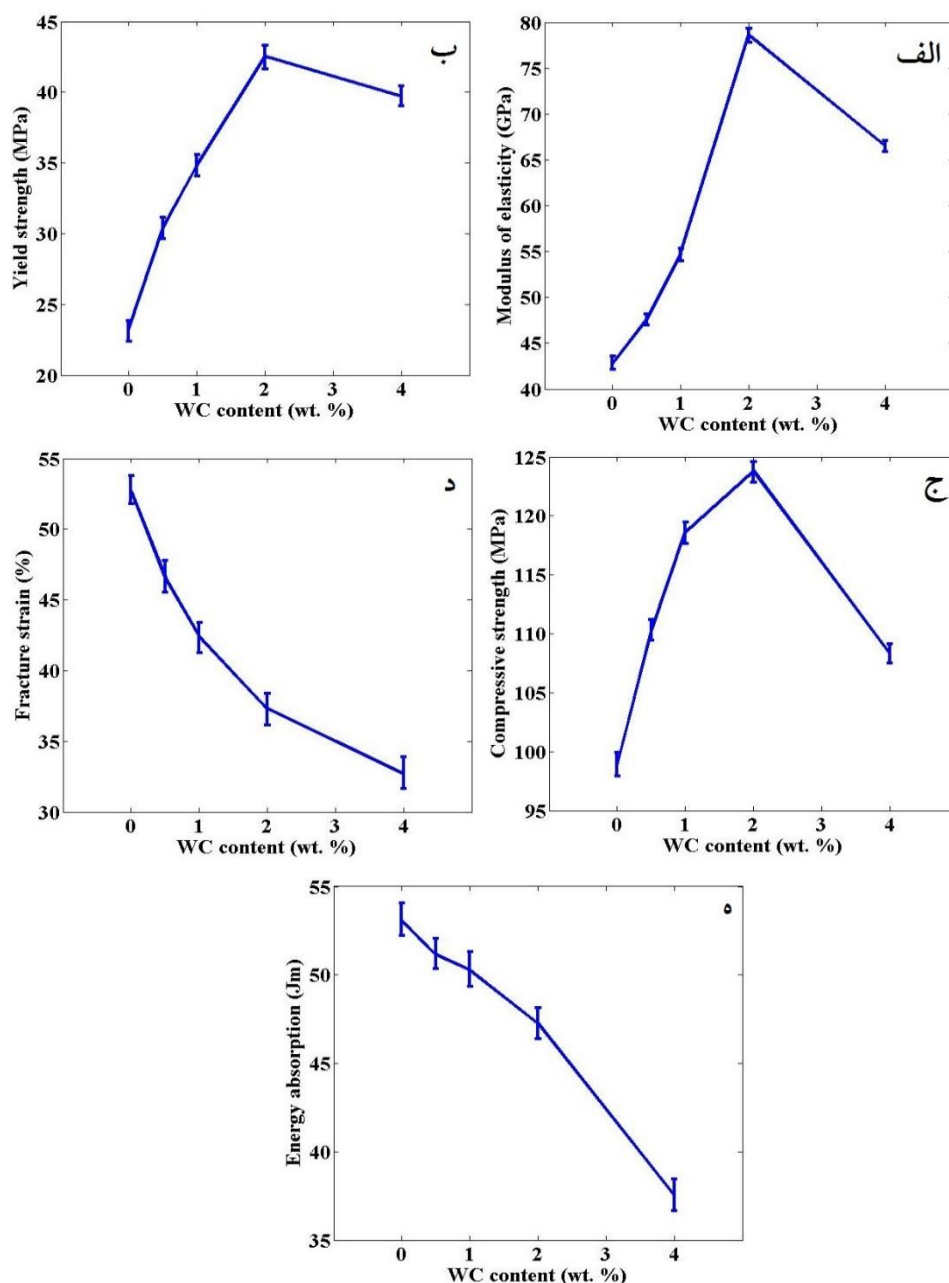
سبب کاهش ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و استحکام فشاری در فولاد تقویت شده با ۴ درصد وزنی ذرات تقویت کننده می‌گردد. این در حالی است که افزایش کاربید تنگستن تأثیر منفی بر روی کرنش نقطه شکست و میزان انرژی جذب شده ایجاد کرده است. به بیان دیگر، با افزایش درصد وزنی ذرات کاربید تنگستن، استحکام فولاد تولید شده افزایش می‌یابد و این در حالی است که شکل‌پذیری و چقرمگی آن کاهش می‌یابد. باید خاطرنشان کرد که در مطالعه کونگ‌کونگ و همکارانش [42] بهبود هم در استحکام و هم در چقرمگی با افزودن ذرات کاربید تنگستن به کلاف آهنی تولید شده به روش ریخته‌گری توپ‌گزارش شده است. احتمالاً این اختلاف در نتایج به ترشوندگی بهتر ذرات تقویت کننده در روش ریخته‌گری ارتباط پیدا کند. علاوه بر این، در پوشش تولید شده به روش ذوبی نیز ذرات کاربید تنگستن بعد از دگرگونی‌های مختلف می‌توانند سبب بهبود توأمان استحکام و چقرمگی شوند [43]. این احتمال می‌رود که در روش‌های ذوبی در مقایسه با روش متالورژی پودر که در این پژوهش بررسی شده است، ذرات تقویت‌کننده بیشتر توسط مذاب احاطه شوند و چسبندگی بهتر بین ذرات و زمینه سبب بهبود در استحکام و چقرمگی شود.



شکل ۹ منحنی‌های تنش - کرنش فشاری فولادهای مرکب تفجوشی شده با مقادیر گوناگون تقویت کننده

شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، همه منحنی‌های تنش - کرنش فشاری به دست آمده یک روند تقریباً مشابه را نشان می‌دهند که شامل دو بخش مجزای ناحیه الاستیک و ناحیه پلاستیک است. علاوه بر این، منحنی‌ها با افزایش مقدار کاربید تنگستن به سمت بالا و به سمت چپ شیفت پیدا می‌کنند. بهبود رفتار فشاری مواد مرکب تولید شده می‌تواند به فعال شدن مکانیزم استحکام‌بخشی توسط ذرات سخت ارتباط پیدا کند [41]. البته، در مورد منحنی نمونه فولاد حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، اُفت تنش و کرنش به صورت توأمان در مقایسه با نمونه فولادی حاوی ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن دیده می‌شود. بروز چنین رفتاری احتمالاً به بیش از حد بودن ذرات سخت و مستحکم کاربید تنگستن ارتباط می‌یابد. این امر سبب تشکیل کلوخه‌هایی از ذرات تقویت کننده در زمینه فولادی می‌شود. تشکیل نواحی کلوخه‌ای و همچنین ممانعت از متراکم شدن در طی مرحله فشردن در مقادیر زیاد کاربید تنگستن می‌تواند از دلایل اصلی اُفت رفتار فشاری در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن در مقایسه با سایر فولادهای تقویت شده باشد. به بیان دیگر، مقادیر زیاد تقویت کننده از توزیع یکنواخت آن جلوگیری می‌کند. تشکیل تخلخل در نواحی کلوخه‌ای نیز می‌تواند سبب تمرکز تنش، جوانه‌زنی و رشد ترک گردد. علاوه بر این، مقادیر زیاد کاربید تنگستن سبب کاهش میزان تراکم‌پذیری در طی مرحله فشردن می‌گردد که کاهش ویژگی‌های مکانیکی نهایی را نتیجه می‌دهد.

نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل منحنی‌های تنش - کرنش فشاری فولادهای تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن شامل ضریب کشسانی، استحکام تسلیم، استحکام فشاری، کرنش نقطه شکست و میزان انرژی جذب شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و استحکام فشاری با افزایش مقدار ذرات کاربید تنگستن تا ۲ درصد وزنی افزایش و بعد از آن کاهش نشان می‌دهند. تشکیل کلوخه‌های ذرات تقویت کننده در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن می‌تواند این رفتار را توجیه کند. علاوه بر این، با افزایش مقدار کاربید تنگستن، فرایند متراکم شدن در مرحله فشردن احتمالاً به خوبی صورت نمی‌گیرد. توزیع غیر یکنواخت ذرات تقویت کننده و تجمع آن‌ها در محل‌های مشخصی سبب کاهش میزان تراکم‌پذیری می‌گردد. این عوامل



شکل ۱۰ (الف) ضریب کشسانی، (ب) استحکام تسلیم، (ج) استحکام فشاری، (د) کرنش نقطه شکست و (ه) میزان انرژی جذب شده بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن به عنوان تقویت کننده در فولادهای مرکب

نتیجه گیری

در این پژوهش، فولادهای تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن به روش متالورژی پودر تولید شده‌اند و تأثیرات افزودن ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) بر روی میزان تخلخل، ریزساختار و رفتار فشاری ارزیابی شده و نتایج زیر به دست آمده است:

۱. میزان چگالی نمونه‌های فولادی تفجوشی شده بین ۶۹۲۷/۹

تا ۷۱۰۱/۱ kg/m^3 و درصد تخلخل آنها بین ۱۷/۲۱ تا ۱۹/۴۱

درصد اندازه گیری شد.

۲. میزان چگالی نمونه‌های تولید شده تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش پیدا کرد و سپس، در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی تقویت کننده افزایش یافت. این مسئله را می‌توان به بالا بودن چگالی کاربید تنگستن (۱۵۸۰۰ kg/m^3) در مقایسه با چگالی فولاد (۷۸۵۰ kg/m^3) مرتبط دانست.

فشاری نمونه‌های تقویت شده مشاهده می‌شود. کاهش تنش و کرنش به صورت همزمان در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی ذرات تقویت کننده نسبت به نمونه حاوی ۲ درصد وزنی تقویت کننده، به بیش از حد بودن ذرات سخت و مستحکم کاربید تنگستن و همچنین تشکیل نواحی کلوخه‌ای این ذرات باز می‌گردد.

سپاسگزاری

۳. در نمونه‌های حاوی ۰ تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن، میزان متراکم شدن در طی فرایند فشردن و در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، چگالی ذرات تقویت کننده عوامل مؤثر اصلی بر روی میزان تخلخل به شمار می‌روند.

۴. افزودن ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن به ترتیب حدوداً ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۱۷ درصد بهبود در مقدار سختی نمونه‌های فولاد تقویت شده را نشان داد. این رفتار را می‌توان مرتبط با اثر ممانعت کنندگی ذرات کاربیدی بر روی حرکت ناب‌جایی‌ها و جلوگیری از ایجاد تغییر شکل پلاستیک دانست.

۵. با افزایش کاربید تنگستن تا ۲ درصد وزنی، بهبود در رفتار

مراجع

- [1] M. Otto, J. Freudenberger, L. Giebler, A. Weidner, and J. Hufenbach, "Developing austenitic high-manganese high-carbon steels for biodegradable stent applications: Microstructural and mechanical studies," *Materials Science and Engineering, A*, vol. 892, p. 145998, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145998>
- [2] Y. Cao, Z. D. Wang, J. Kang, D. Wu, and G. D. Wang, "Effects of tempering temperature and Mo/Ni on microstructures and properties of lath martensitic wear-resistant steels," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 20, no. 4, pp. 70–76, 2013. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60085-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60085-0)
- [3] S. Z. Wei and L. J. Xu, "Review on research progress of steel and iron wear-resistant material," *Acta Metall Sin*, vol. 56, no. 4, pp. 523–538, 2020.
- [4] H. Cheng, X. Luo, and X. Wu, "Recent research progress on additive manufacturing of high-strength low-alloy steels: Focusing on the processing parameters, microstructures and properties," *Materials Today Communications*, vol. 36, p. 106616, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106616>
- [5] K. Li, T. Yang, N. Gong, J. Wu, X. Wu, D. Z. Zhang, and L. E. Murr, "Additive manufacturing of ultra-high strength steels: A review," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 965, p. 171390, 2023.
- [6] S. Cao, N. Ma, Y. Zhang, R. Bo, and Y. Lu, "Fabrication, mechanical properties, and multifunctionalities of particle reinforced foams: A review," *Thin-Walled Structures*, vol. 186, p. 110678, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110678>
- [7] R. Chen, B. Li, and K. Xu, "Effect of particle morphology on fatigue crack propagation mechanism of TiB₂-reinforced steel matrix composites," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 274, p. 108752, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108752>
- [8] D. Kumar, R. Seetharam, and K. Ponappa, "A review on microstructures, mechanical properties and processing of high entropy alloys reinforced composite materials," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 972, p. 172732, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172732>
- [9] F. L. Han, *Handbook of powder metallurgy*. Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 2012, pp. 987–1019.
- [10] A. Muthuchamy and A. R. Annamalai, "Effect of TiC Addition and Heating Mode on the Electrochemical Response

- of Powder Metallurgy Processed Corrosion-Resistant Austenitic and Ferritic Steels," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 60, pp. 121–127, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0249-7>
- [11] Y. Zhang, B. Wang, F. Qiu, H. Yang, and G. C. Barber, "Superior wear resistance of dual-phased TiC–TiB₂ ceramic nanoparticles reinforced carbon steels," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 653–662, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.061>
- [12] C. Tan, W. Ma, C. Deng, D. Zhang, and K. Zhou, "Additive manufacturing SiC-reinforced maraging steel: Parameter optimisation, microstructure and properties," *Advanced Powder Materials*, vol. 2, no. 1, p. 100076, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100076>
- [13] A. Saxena, K. K. Saxena, V. K. Jain, S. K. Rajput, and B. N. Pathak, "A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites," *Materials Today: Proceedings*, 2023, Art. no. 124568. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.227>
- [14] L. B. Niu, X. G. Wang, and Z. M. Fan, "Tribology characteristics of ex-situ and in-situ tungsten carbide particles reinforced iron matrix composites produced by spark plasma sintering," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 28, pp. 449–454, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.003>
- [15] B. Li, J. H. Yao, Q. L. Zhang, Z. H. Li, and L. J. Yang, "Microstructure and tribological performance of tungsten carbide reinforced stainless composite coating by supersonic laser deposition," *Surface and Coatings Technology*, vol. 275, pp. 58–68, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.05.040>
- [16] J. Deng and Z. Zhou, "Fabrication, Tensile, and Hardness Properties of Novel Cast WC-Reinforced 304 Stainless Steel Composites," *JOM*, vol. 75, pp. 1294–1305, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05661-x>
- [17] X. Yan, Y. Zheng, Y. Qiu, G. Qiao, W. Du, H. He, and Q. Bai, "Role of reinforcement on the microstructure of WC reinforced Fe-based composite coating prepared by direct energy deposition," *Materials Characterization*, vol. 209, p. 113731, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113731>
- [18] X. Yu, X. Bai, X. Shi, X. Zhou, and H. Zhang, "Microstructures and properties of wire and arc additively manufactured steel matrix composites with addition of WC by gravity-driven side powder feeding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 81, pp. 236–249, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.004>
- [19] H. Bai, L. Kang, W. Zhuang, J. Liu, L. Zhong, and Y. Xu, "Microstructure and mechanical properties of W-WC/Fe composite fiber-reinforced Fe matrix composite prepared by combination of infiltration and in-situ solid phase diffusion," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, pp. 5305–5314, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.241>
- [20] F. Zhang, W. Zhao, W. Zhang, Z. Liao, X. Xiang, H. Gou, Z. Li, H. Wei, X. Wu, and Q. Shan, "Microstructure, mechanical properties and wear resistance of rare earth doped WC/steel matrix composites: Experimental and calculations," *Ceramics International*, vol. 49, no. 2, pp. 2638–2647, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.244>
- [21] A. Guo, R. Tang, S. Guo, Y. Hu, X. Sheng, Y. Zhang, M. Zhang, P. Qu, and S. Wang, "Acoustic field-assisted powder bed fusion of tungsten carbide-reinforced 316L stainless steel composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 5488–5502, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.271>

- [22] I. D. Olumor, M. Wiśniewska, E. Torresani, and E. A. Olevsky, "Additive manufacturing and spark plasma sintering as effective routes for manufacturing of AISI 316L austenitic stainless steel - WC composites," *Journal of materials research and technology*, vol. 26, pp. 3234–3244, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.125>
- [23] Z. Liao, X. Huang, F. Zhang, Z. Li, S. Chen, and Q. Shan, "Effect of WC mass fraction on the microstructure and frictional wear properties of WC/Fe matrix composites," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 114, p. 106265, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106265>
- [24] X. Yan, C. Chen, R. Zhao, W. Ma, R. Bolot, J. Wang, Z. Ren, H. Liao, and M. Liu, "Selective laser melting of WC reinforced maraging steel 300: Microstructure characterization and tribological performance," *Surface and Coatings Technology*, vol. 371, pp. 355–365, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.033>
- [25] H. Sazegaran, "Investigation on Production Parameters of Steel Foam Manufactured Through Powder Metallurgical Space Holder Technique," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3371–3384, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00659-z>
- [26] H. Sazegaran and M. Hojati, "Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 26, pp. 588–596, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1767-z>
- [27] J. Park, S. Lee, S. Kang, J. Jeon, S. H. Lee, H. Kim, and H. Choi, "Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels," *Powder Technology*, vol. 284, pp. 459–466, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.029>
- [28] V. S. Warke, R. D. Sisson, and M. M. Makhlof, "The effect of porosity on the austenite to ferrite transformation in powder metallurgy steels," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 10-11, pp. 3533–3538, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.092>
- [29] J. Park, S. Lee, S. Kang, J. Jeon, S. H. Lee, H. Kim, and H. Choi, "Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels," *Powder Technology*, vol. 284, pp. 459–466, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.029>
- [30] H. Sazegaran, Z. Valipour, and F. Khorramshahi, "The Effect of Tungsten Carbide Amount on Porosity Percentage, Microstructure and Mechanical Behavior of Steel Foam Produced by Powder Metallurgy Using Space Holder," *Metallurgical Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 142–153, 2020. (In Persian)
- [31] M. Hojati, C. Gierl-Mayer, and H. Danninger, "Impact Fracture Behaviour of Powder Metallurgy Steels Sintered at Different Temperatures," *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 169, pp. 132–139, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00501-024-01428-w>
- [32] B. S. Rao and T. B. Rao, "Effect of Process Parameters on Powder Bed Fusion Maraging Steel 300: A Review," *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, pp. 338–375, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00182-6>
- [33] Y. G. Dorofeev, V. V. Mural', V. T. Prutsakov, et al., "Diffusion of carbon in iron specimens produced by dynamic hot pressing," *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 11, pp. 792–795, 1972. <https://doi.org/10.1007/BF00844703>

- [34] A. Wanalerkngam et al., "The effect of sintering temperature on properties of Fe-Cr-C alloy," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1137, p. 012029, 2021. <https://doi.org/10.22067/jmme.2025.90424.1163>
- [35] H. Palmour, I. Simonsen, and H. Stadelmaier, "The Eutectoids in Iron-Carbon Alloys Prepared by Powder Metallurgy," *International Journal of Materials Research*, vol. 80, no. 8, pp. 563–565, 1989. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1989-800806>
- [36] E. Pagounis and V. K. Lindroos, "Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 246, no. 1-2, pp. 221–234, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00710-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00710-7)
- [37] A. Saxena, K. K. Saxena, V. K. Jain, S. K. Rajput, and B. N. Pathak, "A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites," *Materials Today: Proceedings*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.227>
- [38] F. Velasco, N. Antón, and J. M. Ruiz-Prieto, "Mechanical and corrosion behaviour of powder metallurgy stainless steel based metal matrix composites," *Materials science and technology*, vol. 13, no. 10, pp. 847–856, 1997. <https://doi.org/10.1179/mst.1997.13.10.847>
- [39] A. M. Sankhla, K. M. Patel, M. A. Makhesana, K. Giasin, D. Y. Pimenov, S. Wojciechowski, and N. Khanna, "Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route," *journal of materials research and technology*, vol. 18, pp. 282–292, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.094>
- [40] S. Jeon, X. Liu, C. Azersky, J. Ren, S. Zhang, W. Chen, R. W. Hyers, K. Costa, M. Kolbe, and D. M. Matson, "Particle size effects on dislocation density, microstructure, and phase transformation for high-entropy alloy powders," *Materialia*, vol. 18, p. 101161, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101161>
- [41] B. Niu, J. Chen, Y. Yi, L. Pan, X. Zou, J. Yi, and Y. Hu, "The Effect of Thermal Inputs on Microstructure and Corrosion Resistance of WC Particle-Reinforced High Chromium Wear-Resistant Steel," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 16, no. 7, p. 210766, 2021. <https://doi.org/10.20964/2021.07.08>
- [42] C. Ren, N. Zhao, M. Li, R. Shan, Y. Xu, Z. Cui, and L. Zhong, "Preparation and formation mechanism of (W) WC/Fe bundle reinforced iron matrix composites," *Ceramics International*, vol. 50, no. 11, pp. 19 573–19 582, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.027>
- [43] X. Yan, Y. Zheng, Y. Qiu, G. Qiao, W. Du, H. He, and Q. Bai, "Role of reinforcement on the microstructure of WC reinforced Fe-based composite coating prepared by direct energy deposition," *Materials Characterization*, vol. 209, p. 113731, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113731>