



Microstructure and Tensile Properties of Dual-phase Steels with Variable Manganese Content

Ashkan Nouri ^{a*}, Seyed Mohsen Emami ^a, Seyed Mohammad Hosseini ^a

^a Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, 38156-8-8349 Arak, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Nouri A, Emami S M, Hosseini S M. Microstructure and Tensile Properties of Dual-phase Steels with Variable Manganese Content. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(3):325-341.

doi <https://10.66224/masm.5.3.325>

KEYWORDS

Dual-phase steel,
Manganese,
Microstructure,
Tensile properties,
Heat treatment.

ABSTRACT

In this research, the effect of manganese content on the microstructure and tensile properties of dual-phase steels was studied. At first, three low-carbon steels with fixed carbon and silicon and variable amount of manganese (0.76-2.3wt.%) were produced by melting and casting method. Then the cast steels were hot rolled in several stages to create sheets with a thickness of 2 mm. To create dual-phase ferritic-martensitic structure in steels, they were subjected to intercritical annealing process at three different temperatures of 750, 775 and 800 °C for 20 minutes and then quenched in cold water. According to the variables of intercritical annealing temperature and manganese content, different ratios of volume fraction of ferrite and martensite phases were created in steels. In order to study the role of manganese in dual-phase steels, these steels were subjected to microstructure and tensile properties. The relationship between tensile properties and microstructure was cleared. Increasing Mn at a constant intercritical annealing temperature significantly increased the martensite volume fraction. Meanwhile, the effect of annealing temperature on the volume fraction of martensite was less. The uniaxial tensile test on steels showed that manganese reduces the ductility of steels due to the increase of martensite volume fraction, while it increases their strength. The effectiveness of tensile strength was more than yield strength.

Extended Abstract

1. Introduction

Increasing demand in the automotive industry for low weight materials to reduce fuel consumption has led to the expansion of new high strength steel sheet production. Since the formability of many steels decreases with an increase in their strength, many of the researches conducted for the production of high strength steels have been focused on the issue of optimizing their formability [1]. A study in 1976 showed that the intercritical annealing of low alloy steels in the dual-phase range of austenite and ferrite leads to the creation of steels with a ferritic-martensitic microstructure, which, in addition to having high strength, has better ductility than other high strength low alloy steels [2]. The characteristic of these steels is continuous yield point, low yield strength, high tensile strength, as well as high work hardening rate and ductility, increasing total length more than normal ferritic-pearlitic steels [3-5]. The unique mechanical properties of these steels are due to their microstructural pattern,

* Corresponding author: Mojtaba Rahimi; Tel.: +9809121762635

E-mail address: a-nouri@araku.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.325>.

Received: December 21, 2024; Received in revised form: January 21, 2025; Accepted: February 22, 2025.

© Author



which consists of two main components: martensite and polygonal ferrite [6, 7]. These properties depend on microstructural parameters such as martensite volume fraction, martensite morphology, ferrite grain size, etc. [8-10].

The temperature and time of intercritical annealing in the $\alpha+\gamma$ two-phase range are factors affecting the volume fraction of phases, the shape of phases, the distribution of alloying elements in them, the hardenability of austenite and the size of ferrite grain [9-11]. By increasing the temperature or the intercritical annealing time, because more austenite is formed, the carbon content of austenite decreases. This certainly causes a decrease in the hardenability of austenite [12]. Therefore, some manganese, silicon or chromium is added to the steel composition to improve the hardenability of austenite [13-15]. The amount of martensite carbon content in dual-phase steels is mainly dependent on the intercritical annealing temperature, or in other words, on the volume fraction of martensite [16]. Since the austenite transforms into martensite and its carbon content is actually the same as the carbon in austenite; Therefore, the carbon in martensite will increase with decreasing annealing temperature [17]. In addition to the annealing temperature, which controls the chemical composition and percentage of austenite in the dual-phase region, the amount of alloying elements and the cooling rate of the dual-phase region are also effective on the products created as a result of transformation [14, 18]. It has also been reported that the cooling rate is effective on the amount of martensite carbon content [19]. According to the studies conducted on dual-phase steels, these steels are generally low carbon steels and manganese is a common element in their composition [20]. After carbon, manganese is the most important chemical element in the composition of steels. Manganese is an effective element on the hardenability of steel, which is also economical [21]. Many researches show that the chemical composition of dual-phase steels only contains carbon and manganese and no other elements are present in their composition [22-24]. The increase of manganese generally increases the volume fraction of martensite in steel. Therefore, it affects the properties of dual-phase steel. The microstructural changes made due to the presence of manganese cause changes in the yield strength and tensile strength of steel. By increasing the annealing temperature in the dual-phase range, the strength of the dual-phase steel increases, but the slope of these changes is different for different percentages of carbon and manganese [25].

Although scattered research has been done on the performance of manganese on dual-phase steels, there is no exact consensus on this matter. The purpose of this work is to know as much as possible the effect of manganese on the microstructure of dual-phase steel and its relationship with the tensile behavior of this group of advanced steels. This is important along with the change in the volume fraction of martensite caused by heat treatment variables and also the change in the chemical composition of the steel due to the change in the amount of manganese in the steel. The simultaneous examination of these two factors affecting the volume fraction of martensite and consequently the mechanical properties of steel together can be interesting and challenging.

2. Experimental procedure

In this research, three plain carbon steels with different amounts of manganese in the range of 0.76 to 2.30 wt.% were used. The alloys were melted in an induction furnace with a maximum frequency of 3000 Hz, a maximum power of 75 kW and a maximum voltage of 1200 V, under an atmosphere of argon gas, and then cast into 8 kg ingots with an approximate cross-sectional area of 10x10 cm. The chemical composition of steels is given in Table 1. According to the amount of manganese, these steels were named A, B and C. All the cast ingots were homogenized under a temperature of 1100°C for 18 hours under argon gas atmosphere to minimize segregations caused by casting. Next, in order to reduce the thickness of the samples, they were heated at 1050 °C at a speed of 6 rpm and in 7 rolling stages. Finally, sheets with a thickness of 2 mm were created.

In order to create a dual-phase microstructure in steels, intercritical annealing was performed at three different temperatures of 750, 775, and 800 °C in a resistance furnace with an accuracy of ± 5 °C for 20 minutes and then quenched in water. The resulting two-phase samples were studied by SEM with 30 Kv voltage in addition to light microscopy. The volume fraction of martensite in dual-phase steels was based on the point counting method and based on the ASTM E562-83 standard. To determine the grain size of ferrite in steels, the planimetric method was used based on the ASTM E112 standard. The uniaxial tensile test was performed according to the ASTM-E8 standard at room temperature and at a speed of 2 mm/min. Cutting and preparation of flat tensile samples in the rolling direction was done by wire cutting machine. Brinell hardness test according to DIN 50150 standard was used to determine the hardness of the samples. Examination of fracture surfaces resulting from tensile test was done by SEM.

3. Results and Discussion

Figure 1 shows the optical microstructure of dual-phase steels annealed at 775 °C inter-critical temperature. It can be seen from this figure that the distribution of martensite is uniform in all microstructures. Figure 2 shows the role of manganese and intercritical annealing temperature on the volume fraction of martensite in dual-phase steels. As can be seen, the amount of martensite increases continuously with increasing amount of manganese regardless of the annealing temperature. An increase in manganese causes a decrease in ferrite and, as a result, a decrease in the amount of austenite. Therefore, the volume fraction of formed martensite also increases. Figure 2 shows that regardless of the chemical composition of the steel, increasing the annealing temperature increases the volume fraction of martensite. The reason for this is the formation of more austenite in the two-phase range with the increase of intercritical temperature. This can be justified based on phase equilibrium and lever law.

Table 1. Chemical composition of investigated steels (weight percentage)

Sample	C	Si	Mn	P	S
A	0.12	0.57	0.76	0.011	0.007
B	0.12	0.45	1.76	0.010	0.009
C	0.12	0.47	2.30	0.013	0.015

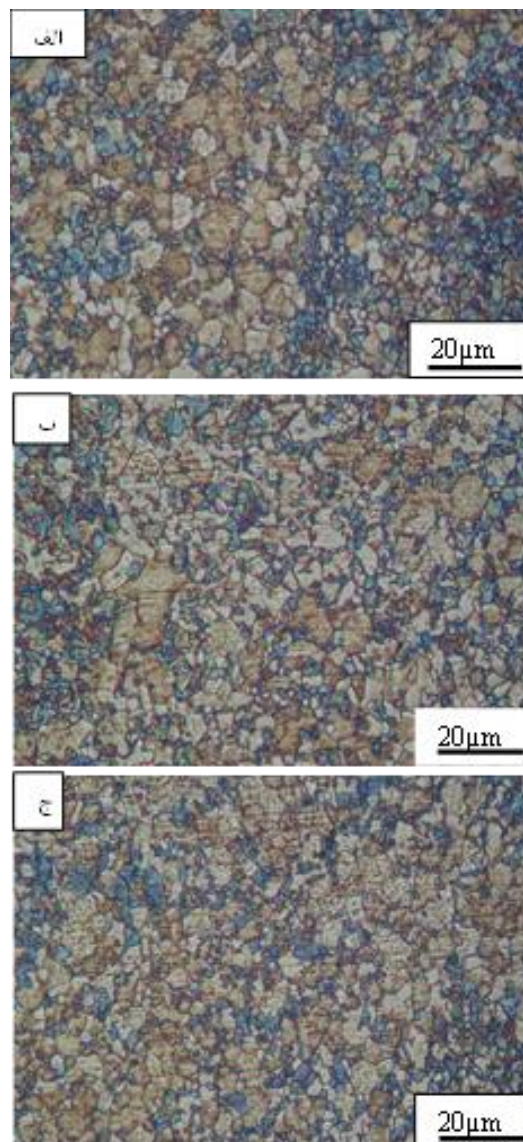


Figure 1. Optical microstructure of two-phase steels with variable manganese intercritically annealed at 775°C for 20 minutes. A) steel A, b) steel B and c) steel C

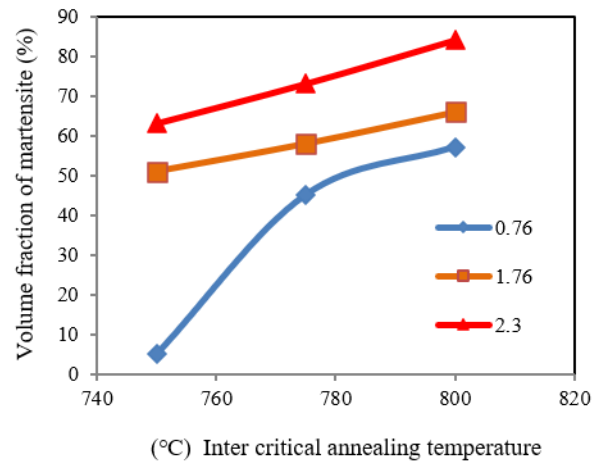


Figure 2. Volume fraction of martensite change with intercritical annealing temperature in variable manganese steels

The summary of tensile test results is presented in Table 2. All samples show high tensile strength. However, the yield strength is low in all samples. Also, the ratio of yield to tensile strength (yield ratio) in all samples (except for the low manganese sample A which was annealed at a low temperature of 750 °C) is low and between 0.55 and 0.65. In all steels, regardless of the amount of manganese in the steel, increasing the annealing temperature increases the tensile strength of the two-phase steel. The reason for this can be explained in the increase in the volume fraction of the hard martensite phase with the increase in the annealing temperature. The strengthening mechanism through martensite, along with the solid solution mechanism caused by the dissolution of manganese, are factors to improve strength. It can be seen that the yield strength also increases with the annealing temperature and the percentage of manganese, just like the tensile strength, but the intensity of its increase is less compared to the tensile strength. When the samples are heated in the dual-phase region of austenite and ferrite, the pearlite regions turn into austenite, and by quenching the steel, the existing austenite turns into martensite and appear as island-shaped regions in the ferrite field. Martensite volume fraction changes are equal to austenite percentage changes. According to the obtained results, it can be said that as the intercritical temperature and the amount of manganese in dual-phase steel increase, the tensile strength and yield strength increase and the changes in elongation and ductility decrease.

4. Conclusion

Manganese is used as an economic alloying element in steels. Since the most important application of dual-phase steel is in the automotive industry, it is necessary for these steels to be low-carbon. In this research, in order to identify the role of this element on the performance of two-phase steel, three different amounts of manganese were used with different fractions of austenite in the two-phase region by applying different intercritical temperatures. Manganese has a significant effect on the volume fraction of martensite and as a result its chemical composition. therefore; It is expected to affect the tensile properties of dual-phase steels. The highest yield and tensile strength are related to the highest intercritical annealing temperature and the highest amount of manganese, which was associated with the highest volume fraction of martensite. This indicates that the volume fraction of martensite is a more effective factor compared to its chemical composition. Tensile test also showed that with the increase of martensite volume fraction, the ductility of dual-phase steel decreases, however, the ductility of these steels at a high strength (more than 700 MPa) still remains acceptable (strain at least 15%). Tensile results indicate that, in general, the presence of high manganese in the amount of 2.3 wt.% is favorable for tensile behavior.

Table 3. Summary of tensile results of samples.

Sample	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	σ_y/UTS	ϵ_u (%)	ϵ_t (%)
A-750	395	460	0.85	20.2	21.7
A-775	430	662	0.65	17.8	19.4
A-800	455	695	0.65	16.7	18.1
B-750	444	718	0.61	16.3	17.8
B-775	457	739	0.61	14.6	16.2
B-800	469	781	0.60	13.5	15.2
C -750	453	788	0.57	14.1	16.1
C-775	475	839	0.56	13.2	15.5
C-800	477	851	0.56	11.6	14



ریزساختار و خواص کششی فولادهای دوفازی با مقدار منگنز متغیر

اشکان نوری^{الف}، سید محسن امامی^ب، سید محمد حسینی^ج^{الف} دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a-nouri@araku.ac.ir^ب استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-emami@araku.ac.ir^ج کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، smhosseini67@gmail.com

واژگان کلیدی	چکیده
فولاد دوفازی، منگنز، ریزساختار، خواص کششی، عملیات حرارتی.	در این پژوهش تاثیر مقدار منگنز بر ریزساختار و خواص کششی فولادهای دوفازی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا سه فولاد کم کربن با کربن و سیلیسیم ثابت و مقدار منگنز متغیر (۰/۷۶-۲/۳۰ wt.%) به روش ذوب و ریخته‌گری تولید شدند. سپس فولادهای ریخته‌گری در چندین مرحله جهت ایجاد تسمه‌هایی به ضخامت ۲mm نورد گرم شدند. برای ایجاد ساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی در فولادها، آن‌ها در سه دمای مختلف ۷۷۵، ۷۵۰ و ۸۰۰°C به مدت ۲۰ دقیقه تحت فرآیند آنیل بین بحرانی قرار گرفته و سپس در آب سرد کوئنچ شدند. با توجه به متغیرهای دمای آنیل بین بحرانی و مقدار منگنز، نسبت‌های مختلفی از کسر حجمی فازهای فریت و مارتنزیت در فولادها ایجاد شد. به منظور مطالعه نقش منگنز در فولادهای دوفازی، این فولادها تحت مطالعه ریزساختاری و خواص کششی قرار گرفته و ارتباط خواص کششی با ریزساختار تبیین شد. افزایش منگنز در یک دمای آنیل بین بحرانی ثابت به صورت قابل توجهی کسر حجمی مارتنزیت را افزایش داد. این در حالی است که اثرگذاری دمای آنیل بر کسر حجمی مارتنزیت کمتر بود. آزمایش کشش تک محوری بر روی فولادها نشان داد که منگنز با توجه به افزایش کسر حجمی مارتنزیت باعث کاهش انعطاف‌پذیری فولادها می‌شود، درحالی‌که استحکام آن‌ها را افزایش می‌دهد که البته در این بین تأثیرپذیری استحکام کششی بیش از استحکام تسلیم بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴	

۱- مقدمه

افزایش تقاضا در صنعت اتومبیل‌سازی برای مواد با وزن پایین جهت کاهش مصرف سوخت، منجر به گسترش تولید ورق‌های فولادی استحکام بالایی جدید شده است. از آنجایی‌که شکل‌پذیری خیلی از فولادها با افزایش استحکام آن‌ها کاهش می‌یابد، بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته برای تولید فولادهای استحکام بالا، بر موضوع بهینه کردن شکل‌پذیری آن‌ها متمرکز شده است [۱]. مطالعه‌ای در سال ۱۹۷۶ نشان داد که آنیل میان بحرانی فولادهای کم آلیاژ در محدوده دوفازی آستنیت و فریت، منجر به ایجاد فولادهایی با ریزساختار فریتی-مارتنزیتی می‌شود که علاوه بر برخورداری از استحکام بالا، انعطاف‌پذیری بهتری نسبت به سایر فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا که از طریق سایر روش‌ها نظیر رسوب‌سختی یا سخت‌گردانی محلول جامد، سخت شده‌اند، دارا می‌باشد [۲]. حضور هم‌زمان این دو ویژگی در فولادهای معمولی دیگر تقریباً ممکن نیست و به علت همین ویژگی‌های منحصربه‌فرد فولاد دوفازی، این فولاد امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مشخصه این فولادها نقطه تسلیم پیوسته، استحکام تسلیم پایین استحکام کششی بالا و نیز نرخ کارسختی و انعطاف‌پذیری بالا، افزایش طول کلی بیشتر نسبت به

فولادهای فریتی- پرلیتی معمولی است [۳-۵]. خواص مکانیکی منحصربه‌فرد این فولادها ناشی از الگوی ریزساختاری آنها است که متشکل از دو جزء اصلی مارتنزیت و زمینه فریت پلی‌گونال است [۶ و ۷]. این خواص به پارامترهای ریزساختاری نظیر کسر حجمی مارتنزیت، مورفولوژی مارتنزیت و اندازه دانه فریت و ... بستگی دارد [۸-۱۰].

دما و زمان آنیل میان بحرانی در محدوده دو فازی $\alpha + \gamma$ از عوامل مؤثر بر کسر حجمی فازها، شکل فازها، توزیع عناصر آلیاژی در آنها، سختی‌پذیری آستنیت و اندازه دانه فریت می‌باشند [۹-۱۱]. با افزایش دما یا زمان آنیل میان بحرانی مطابق با نمودار فازی آهن - کربن، کسر حجمی آستنیت تشکیل شده و در نتیجه کسر حجمی مارتنزیت حاصل بیشتر خواهد شد. از طرف دیگر، با افزایش دما و یا زمان آنیل میان بحرانی، به دلیل اینکه آستنیت بیشتری تشکیل می‌شود، از مقدار کربن آستنیت کاسته می‌شود. این امر در نهایت سبب کاهش سختی‌پذیری آستنیت می‌شود [۱۲]. از این رو، به ترکیب فولاد مقداری منگنز، سیلیسیم و یا کروم افزوده می‌شود تا سختی‌پذیری آستنیت بهبود یابد [۱۳-۱۵]. مقدار کربن مارتنزیت در فولادهای دو فازی، به‌طور عمده به دمای آنیل بین بحرانی یا به تعبیر دیگر به کسر حجمی مارتنزیت وابسته است [۱۶]. هنگامی که دمای بین بحرانی کاهش یابد، مقدار کربن در آستنیت موجود در ناحیه دو فازی $\alpha + \gamma$ ، افزایش پیدا خواهد کرد. از آنجایی که این آستنیت به مارتنزیت استحاله می‌یابد و مقدار کربن آن در واقع همان کربن موجود در آستنیت است؛ بنابراین، کربن موجود در مارتنزیت نیز با کاهش دمای آنیل افزایش خواهد یافت [۱۷]. علاوه بر دمای آنیل که ترکیب شیمیایی و درصد آستنیت در ناحیه دو فازی را کنترل می‌کند، میزان عناصر آلیاژی و نیز نرخ سرمایش از ناحیه دو فازی نیز بر روی محصولات ایجادشده در اثر استحاله مؤثرند [۱۴ و ۱۸]. همچنین گزارش شده است که نرخ سرمایش نیز بر میزان کربن مارتنزیت مؤثر است [۱۹].

بدون شک ترکیب شیمیایی یکی از فاکتورهای خیلی مهم بر خواص فولادها و از جمله فولادهای دوفازی ترکیب شیمیایی آنها است. با توجه به مطالعات صورت گرفته پیرامون فولادهای دو فازی، این فولادها به‌طور کلی در زمره فولادهای کم کربن بوده و منگنز یک عنصر متداول در ترکیب آنها است [۲۰]. بعد از کربن، منگنز مهم‌ترین عنصر شیمیایی در ترکیب فولادهاست. منگنز عنصری مؤثر بر سختی‌پذیری فولاد است که به لحاظ اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است [۲۱]. بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی فولادهای دوفازی فقط حاوی کربن و منگنز بوده و هیچ عنصر دیگری به‌صورت خواسته در ترکیب آنها وجود ندارد [۲۲-۲۴].

افزایش منگنز به‌طور کلی موجب افزایش کسر حجمی مارتنزیت در فولاد می‌شود. از این رو، بر خواص فولاد دو فازی تأثیر می‌گذارد. تغییرات ریزساختاری صورت گرفته به‌واسطه حضور منگنز موجب تغییر در استحکام تسلیم و کششی فولاد می‌گردد. با افزایش دمای آنیل در محدوده دو فازی، استحکام فولاد دو فازی افزایش می‌یابد، اما شیب این تغییرات برای درصدهای مختلف کربن و منگنز متفاوت است [۲۵]. تغییرات در استحکام برای فولادهای کم کربن و کم منگنز کوچک است، در حالی که مقادیر بیشتر کربن یا منگنز در فولاد، نقش استحکام بخشی بیشتری خواهند داشت [۲۵]. Terao [۲۶ و ۲۷] با مطالعه فولادهای دو فازی پرمنگنز، حاوی حدود ۳٪ منگنز، ادعا کرده است که این فولادهای دو فازی به علت داشتن Mn بالا، قابلیت ایجاد مارتنزیت ظریف در اثر سرد شدن در هوا را دارند که منجر به استحکام کششی بالاتر و انعطاف‌پذیری خوب می‌شود. منگنز بالا اثرات سودمندی نظیر استحکام بخشی مکانیکی فریت و مارتنزیت را دارد و دماهای بحرانی A_1 و A_3 را کاهش می‌دهد؛ ضمن اینکه در فولادهای پر منگنز، فاز مارتنزیت به آسانی در اثر سرمایش در هوا ایجاد می‌شود [۲۶].

منگنز سرعت سرمایش بحرانی برای دگرگونی آستنیت به مارتنزیت را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، منگنز در بهبود استحکام فولاد ناشی از استحکام بخشی محلول جامد در آستنیت یعنی؛ مارتنزیت نقش دارد [۲۸]. به‌طور کلی، می‌توان گفت که کسر حجمی مارتنزیت و به دنبال آن استحکام فولاد دو فازی متناسب با میزان کربن و منگنز فولاد است.

اگرچه در موضوع عملکرد منگنز بر فولادهای دوفازی تحقیقات پراکنده‌ای انجام شده است ولی به‌هر حال اتفاق نظر دقیقی در این مورد وجود ندارد. هدف از انجام کار حاضر شناخت هرچه بیشتر نحوه اثرگذاری منگنز بر ریزساختار فولاد دوفازی و ارتباط آن با رفتار کششی این خانواده از فولادهای پیشرفته است. این امر در کنار تغییر کسر حجمی مارتنزیت ناشی از متغیرهای عملیات حرارتی و نیز تغییر ترکیب شیمیایی فولاد به‌واسطه تغییر در مقدار منگنز فولاد و بررسی هم‌زمان این دو فاکتور اثرگذار بر کسر حجمی مارتنزیت و به تبع آن خواص مکانیکی فولاد در کنار هم می‌تواند مهم و چالش برانگیز باشد.

۲- روش پژوهش

در تحقیق حاضر سه فولاد ساده کربنی با مقادیر مختلف منگنز در محدوده ۰/۷۶ تا ۲/۳۰ wt.% مورد استفاده واقع شدند. آلیاژها در یک کوره القایی با حداکثر فرکانس ۳۰۰۰ هرتز، حداکثر توان ۷۵ کیلو وات و حداکثر ولتاژ ۱۲۰۰ ولت، تحت اتمسفر گاز آرگون ذوب و سپس به شمش‌های ۸ کیلوگرمی با سطح مقطع تقریبی ۱۰×۱۰ cm ریخته‌گری شدند. ترکیب شیمیایی فولادها در جدول ۱ آورده شده است. برحسب مقدار منگنز این فولادها A، B و C نام‌گذاری شدند.

ذوب فولاد در دمای ۱۶۰۰°C صورت گرفته و ذوب ریزی آن در دمای ۱۵۵۰°C انجام شد. بار کوره قراضه فولادی کم کربن بود و برای دستیابی به منگنز مشخص از فرومگنز ۵۰٪ استفاده شد. قبل از انجام فرآیند ریخته‌گری اکسیژن‌زدایی و آخال‌زدایی فولادها به‌دقت انجام شد تا فولادهایی تمیز تهیه گردد. ترکیب شیمیایی مذاب در چندین مرحله با استفاده از روش اسپکتروسکوپی نشری اندازه‌گیری و جهت رسیدن به ترکیب مورد نظر کنترل شد. همچنین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها بعد از انجماد نیز به روش کوانتومتری به‌دقت کنترل شدند. کلیه شمش‌های ریخته شده تحت دمای ۱۱۰۰°C برای ۱۸ ساعت تحت اتمسفر گاز آرگون همگن‌سازی شدند تا جدایش‌های ناشی از ریخته‌گری به حداقل برسند. در ادامه به‌منظور کاهش ضخامت نمونه‌ها در دمای ۱۰۵۰°C با سرعت ۶ دور بر دقیقه و در ۷ مرحله نورد گرم شدند. درنهایت تسمه‌هایی با ضخامت ۲ mm ایجاد شد.

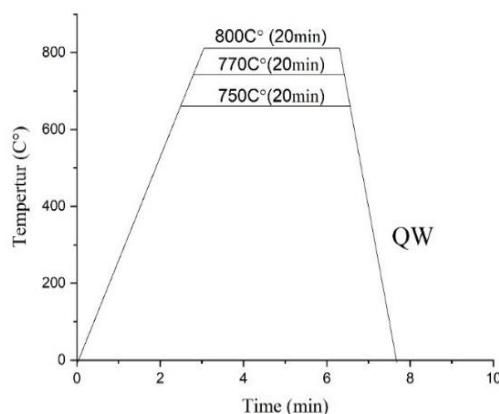
جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولادهای مورد بررسی (درصد وزنی)

نمونه	C	Si	Mn	P	S
A	۰/۱۲	۰/۵۷	۰/۷۶	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷
B	۰/۱۲	۰/۴۵	۱/۷۶	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹
C	۰/۱۲	۰/۴۷	۲/۳۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵

نمونه‌های متالوگرافی با هدف مطالعه کمی و کیفی ریزساختار شامل کسر حجمی فازها، اندازه دانه فریت، توزیع و مورفولوژی فازهای فریت و مارتنزیت و نیز وضعیت تیغه‌های مارتنزیت توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) براساس استاندارد ASTM E407 آماده‌سازی شده و سپس در محلول نایتال ۳٪ اچ شدند. در ادامه نمونه‌های متالوگرافی و کشش به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۲۰°C نرماله شدند. برای ایجاد ریزساختار دو فازی در فولادها، عملیات آنیل بین بحرانی در سه دمای مختلف ۷۵۰، ۷۷۵ و ۸۰۰°C در یک کوره مقاومتی با دقت ۵±°C به مدت ۲۰ دقیقه و سپس سرمایش سریع در آب انجام شد. این امر موجب تغییر در کسر حجمی فازهای سازنده فریت و مارتنزیت در هریک از فولادها می‌گردد. درواقع نمونه‌های نورد گرم شده با ریزساختار اولیه فریتی-پرلیتی در ناحیه دو فازی فریت/آستنیت به مدت کافی گرم شدند تا آستنیت و فریت در آن‌ها با نسبت‌های مشخص تشکیل شوند، سپس با کوئنچ فولادها در آب آستنیت موجود در آن‌ها به مارتنزیت بدیل شده و ساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی تشکیل گردید. با توجه به میزان متفاوت منگنز در فولادها که عاملی اثرگذار بر ریزساختار است و نیز تفاوت در دمای آنیل بین بحرانی فولادها، پس از عملیات حرارتی نسبت‌های فازی متفاوتی داشتند. نمونه‌ها تحت اتمسفر خنثی حرارت داده شدند. شکل ۱ شماتیک سیکل عملیات حرارتی انجام شده بر روی فولادها را نشان می‌دهد. نمونه‌های دو فازی حاصل علاوه بر میکروسکوپ نوری به وسیله SEM با ولتاژ ۳۰ Kv مطالعه شدند. کسر حجمی مارتنزیت در فولادهای دوفازی مبتنی بر روش شمارش نقطه و بر اساس استاندارد ASTM E562-83 و انجام شد. برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری، این فرآیند در ۳ محل مختلف از نمونه انجام شد و در مجموع حداقل ۱۰۰۰ نقطه مورد شمارش قرار گرفت. برای تعیین اندازه دانه‌های فریت در فولادها از روش پلاتنی‌متری بر اساس استاندارد ASTM E112 استفاده شد.

آزمون کشش تک محوری طبق استاندارد ASTM-E8 در دمای اتاق و با سرعت ۲ mm/min صورت گرفت. برش و تهیه نمونه‌های کشش تخت در جهت نورد توسط دستگاه وایرکات انجام شد. از هر یک از شرایط، ۳ نمونه استاندارد کشش تهیه و میانگین نتایج آن‌ها گزارش گردید. با توجه به نتایج آزمون و منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده استحکام تسلیم، استحکام کششی و کرنش کل مشخص شد. برای اندازه‌گیری ازدیاد طول نمونه‌ها از یک اکستنسومتر استفاده شد. برای تعیین سختی

نمونه‌ها از آزمون سختی سنجی برینل طبق استاندارد DIN 50150 استفاده شد. بررسی سطوح شکست حاصل از آزمایش کشش توسط SEM انجام شد.

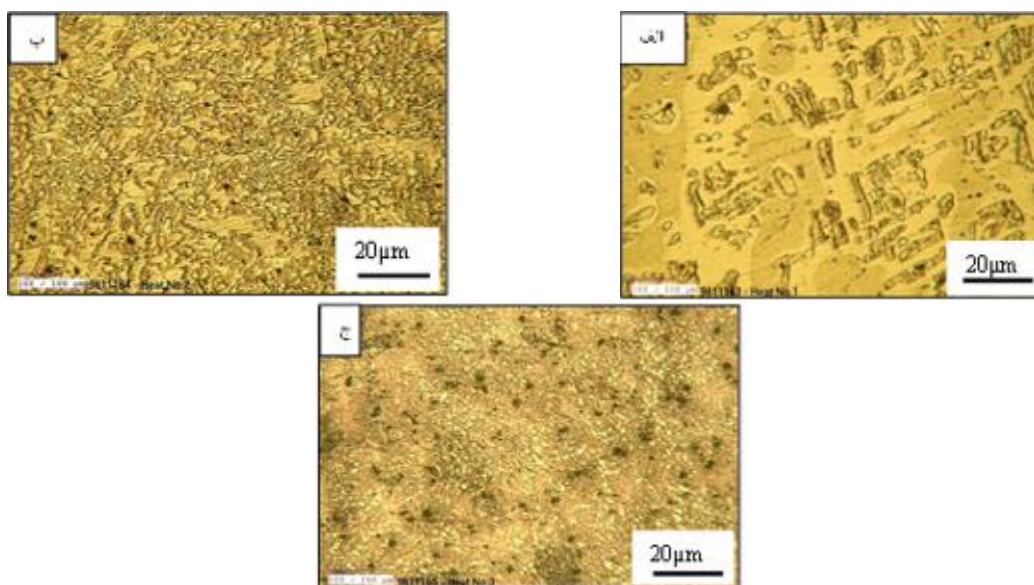


شکل ۱ شماتیک سیکل عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی بر روی فولادها

۳- نتایج و بحث

• ریزساختار

شکل ۲ ریزساختار نوری فولادهای ریختگی تهیه شده را نشان می‌دهد. توزیع فاز فریت و ساختار پرلیتی در فولادها در شکل دیده می‌شود. ساختار اولیه فولاد بی شک بر ریزساختار دو فازی حاصل از عملیات دو فازی شدن نیز مؤثر خواهد بود.



شکل ۲ ریزساختار ریختگی نمونه‌های فولادی با درصدهای مختلف منگنز. الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C

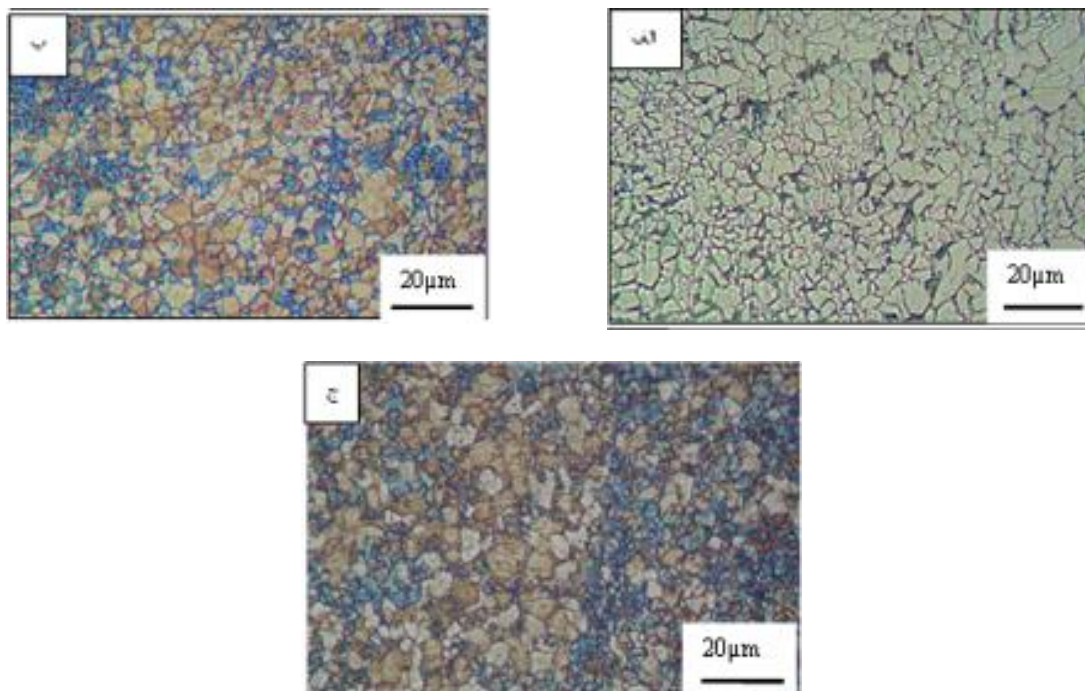
جدول ۲ خلاصه نتایج ریزساختاری فولادها را بعد از ریخته‌گری نشان می‌دهد. با افزایش میزان منگنز فولاد در ساختار ریختگی، مقدار پرلیت موجود در ساختار افزایش و مقدار فریت آن کاهش یافته است. به‌طوری‌که با تغییر منگنز از ۰/۷۶٪ به ۲/۳٪، پرلیت در حدود ۵۰٪ افزایش یافت. با توجه به آنکه وجود منگنز بیشتر باعث کاهش مقدار کربن یوکتوئید فولاد می‌شود لذا، این امر منطقی به نظر می‌رسد. از این رو می‌توان منگنز را در اینجا یک عنصر پرلیت زا محسوب کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش منگنز اندازه دانه فریت موجود در فولاد افزایش یافته است اگرچه این افزایش خیلی محسوس نیست.

جدول ۲ خلاصه نتایج ریزساختاری فولادهای ریختگی با مقدار منگنز متفاوت

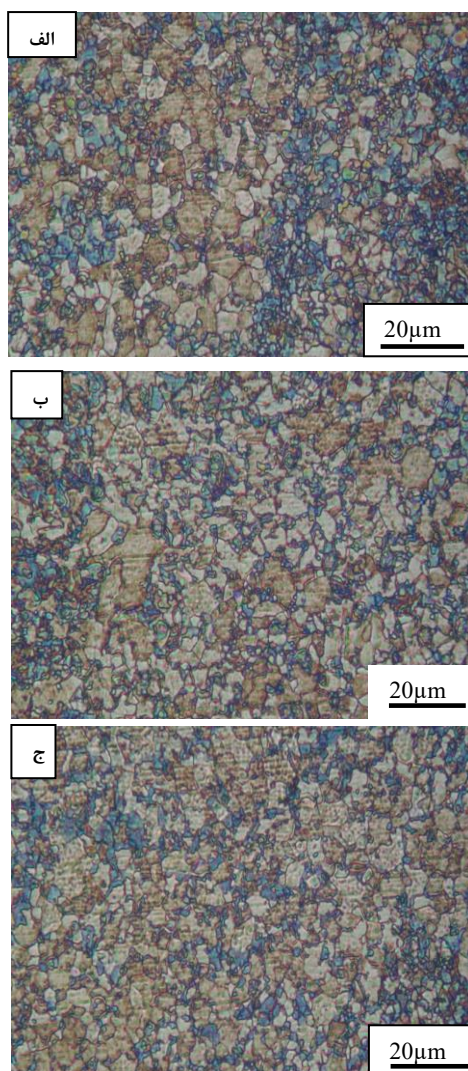
اندازه دانه فریت (μm)	درصد حجمی پرلیت	مقدار منگنز
۱۶	۵۱	۰/۷۶
۱۸	۶۵	۱/۷۶
۲۱	۷۶	۲/۳

شکل ۳ تصویر ریزساختاری از نمونه‌ها با مقدار منگنز مختلف را بعد از فرآیند نورد گرم نشان می‌دهد. ریزساختار نمونه‌ها بعد از نورد گرم همانند ساختار ریختگی متشکل از فریت و پرلیت است. بررسی اندازه دانه فریت در فولادها بعد از نورد گرم اندکی افزایش نشان داد. به‌طوری‌که اندازه دانه‌ها از $21\mu\text{m}$ در نمونه A به $26\mu\text{m}$ در نمونه C رسید.

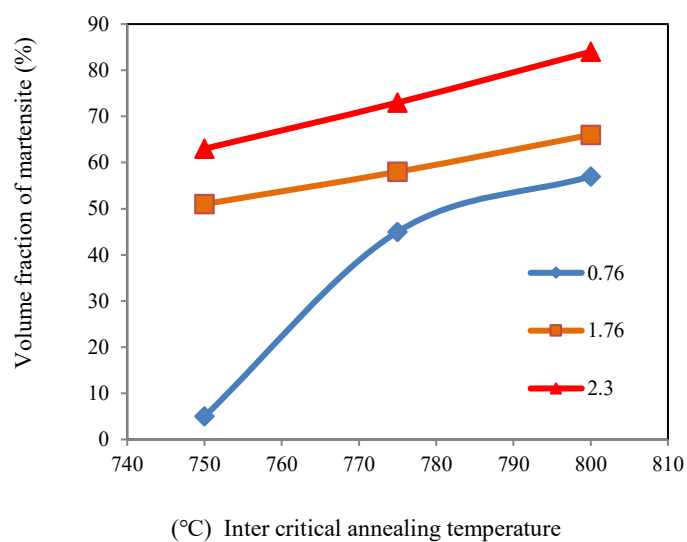
شکل ۴ ریزساختار نوری فولادهای دوفازی را که در دمای 775°C آنیل میان بحرانی شده‌اند را نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که توزیع مارتنزیت در تمام ریزساختارها یکنواخت است. نواحی تیره مبین مارتنزیت و نواحی روشن فریت هستند. در نمونه‌های آنیل بین بحرانی شده در دماهای 750°C و 800°C نیز ساختار دوفازی به خوبی تشکیل شد. در دماهای پایین، منگنز تمایل دارد از فریت به درون آستنیت نفوذ کند و به علت آنکه سرعت نفوذ منگنز در فریت بیش از سه برابر سرعت نفوذ آن در آستنیت است می‌توان نتیجه گرفت که این مرحله از آستنیت‌زایی توسط سرعت نفوذ منگنز به درون فریت کنترل می‌شود [۱۴]. نفوذ منگنز چه از درون فریت و چه از مرزدانه فریت منجر به ایجاد یک حلقه آستنیت غنی از منگنز در اطراف آستنیت می‌شود که سختی‌پذیری بالایی دارد و از تشکیل آستنیت باقی‌مانده در سرعت‌های سرد کردن پایین جلوگیری می‌کند. در خلال نگهداری در محدوده دوفازی، آستنیت روی ذرات سمنتیت واقع شده بر مرزهای آن‌ها با فریت جوانه‌زنی کرد. کوئنچ از محدوده بین بحرانی موجب استحاله آستنیت به مارتنزیت می‌گردد. دیده می‌شود که با افزایش منگنز مقدار مارتنزیت افزایش می‌یابد. شکل ۵ نقش منگنز و دمای آنیل بین بحرانی را بر کسر حجمی مارتنزیت موجود در فولادهای دوفازی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار مارتنزیت با افزایش مقدار منگنز صرف‌نظر از دمای آنیل به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. از آنجایی که منگنز یک عنصر پایدار کننده پایدار کننده آستنیت است، تأثیر قابل توجهی بر میزان آستنیت تشکیل شده در حین گرمایش در منطقه دو فازی $\gamma+\alpha$ و در ادامه پس از کوئنچ از دمای آنیل، بر میزان مارتنزیت تشکیل شده در فولاد دارد.



شکل ۳ ریزساختار حاصل از نورد گرم نمونه‌های فولادی با درصد‌های مختلف منگنز. الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C



شکل ۴ ریزساختار نوری فولادهای دوفازی با منگنز متغیر آنیل بین بحرانی شده در 775°C به مدت ۲۰ دقیقه. الف) فولاد A، ب) فولاد B و ج) فولاد C

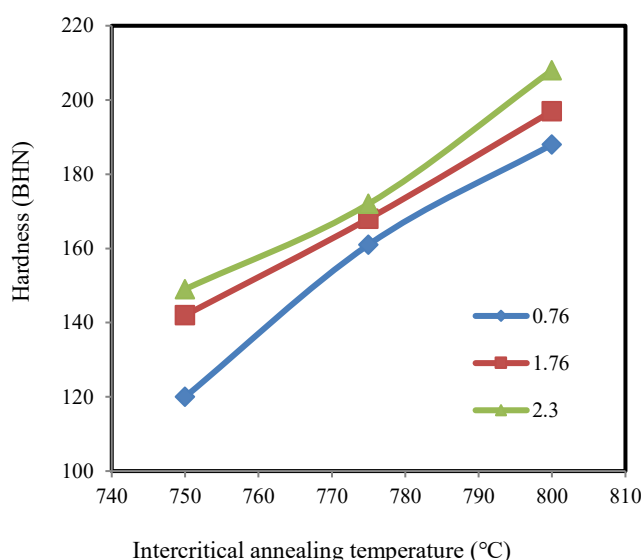


شکل ۵ تغییر کسر حجمی مارتنزیت با دمای آنیل بین بحرانی در فولادهای حاوی منگنز متغیر

افزایش منگنز، موجب کاهش فریت و در نتیجه کاهش میزان آستنیت می‌شود. بنابراین کسر حجمی مارتنزیت تشکیل شده نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که زمان و دمای آنیل بین بحرانی به اندازه کافی زیاد باشد، جدایش منگنز در آستنیت صورت گرفته و این امر باعث پایداری آستنیت می‌شود [۲۸]. در نتیجه، در صورت فراهم شدن نرخ سرمایش کافی، امکان ایجاد مارتنزیت افزایش می‌یابد. در هر سه فولاد به کار رفته در این تحقیق، علاوه بر مقدار کربن که مقدار یکسان 0.12% وزنی بود، مقدار سیلیسیم فولاد نیز که می‌تواند بر کسر حجمی فازها در فولاد دو فازی مؤثر باشد در حدود 0.05% وزنی ثابت نگه داشته شد. بنابراین، می‌توان با اطمینان، تغییر در میزان مارتنزیت در فولادها را از حیث ترکیب شیمیایی و در شرایط آنیل یکسان، به مقدار منگنز فولادها مرتبط کرد. نکته دیگری که از شکل ۵ برداشت می‌شود این است که اختلاف حداکثر و حداقل مارتنزیت که به ترتیب مربوط به دمای آنیل حداکثر و حداقل هستند با افزایش منگنز کاهش می‌یابد. در نتیجه، می‌توان گفت که با افزایش منگنز فولاد، میزان تغییرپذیری کسر حجمی فازهای فریت و مارتنزیت تشکیل شده با دمای آنیل کاهش می‌یابد. به طوری که، تغییر نسبت فازها به وسیله تغییر دمای آنیل کاهش می‌یابد. این ویژگی در کنترل ریزساختار فولادهای دو فازی و به ویژه کنترل میزان مارتنزیت و فریت موجود در فولاد، امری مطلوب به حساب می‌آید. شکل ۵ نشان می‌دهد که صرف نظر از ترکیب شیمیایی فولاد، افزایش دمای آنیل موجب افزایش کسر حجمی مارتنزیت می‌شود. علت این امر تشکیل بیشتر آستنیت در محدوده دو فازی، با افزایش دمای بین بحرانی است. این امر بر اساس تعادل فازی و قانون اهرم قابل توجیه است.

• خواص مکانیکی

شکل ۶ سختی فولادهای دوفازی را در مقادیر متفاوت منگنز و دمای آنیل بین بحرانی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سختی فولادها با افزایش دمای آنیل و نیز مقدار منگنز طبق یک روند تقریباً خطی افزایش می‌یابد. برای بررسی خواص مکانیکی فولادهای دو فازی، آزمایش کشش بهترین نتایج را ارائه می‌کند. خلاصه نتایج آزمون‌های کشش در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی، نسبت تسلیم، درصد ازدیاد طول کل و یکنواخت هر سه فولاد که در دماهای مختلف به مدت ۲۰ دقیقه آنیل شده‌اند، داده شده است. کلیه نمونه‌ها استحکام کششی بالایی را نشان می‌دهند. این در حالی است که استحکام تسلیم در تمام نمونه‌ها پایین است. همچنین نسبت استحکام تسلیم به کششی (نسبت تسلیم)، در تمام نمونه‌ها (به غیر از نمونه کم منگنز A که در دمای پایین 750°C آنیل شده است) پایین و بین 0.55 تا 0.65 است.



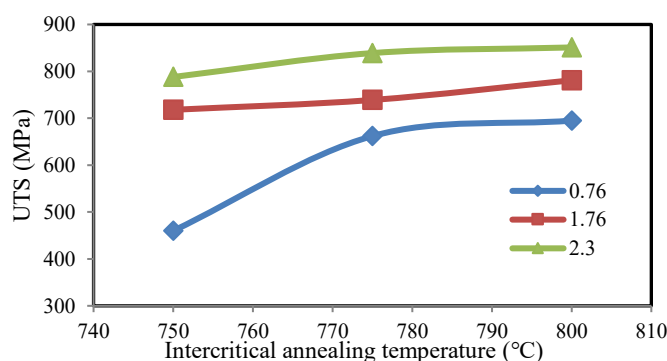
شکل ۶ تأثیر منگنز و دمای آنیل بین بحرانی بر سختی فولادهای دو فازی

جدول ۳ خلاصه نتایج کشش نمونه‌ها

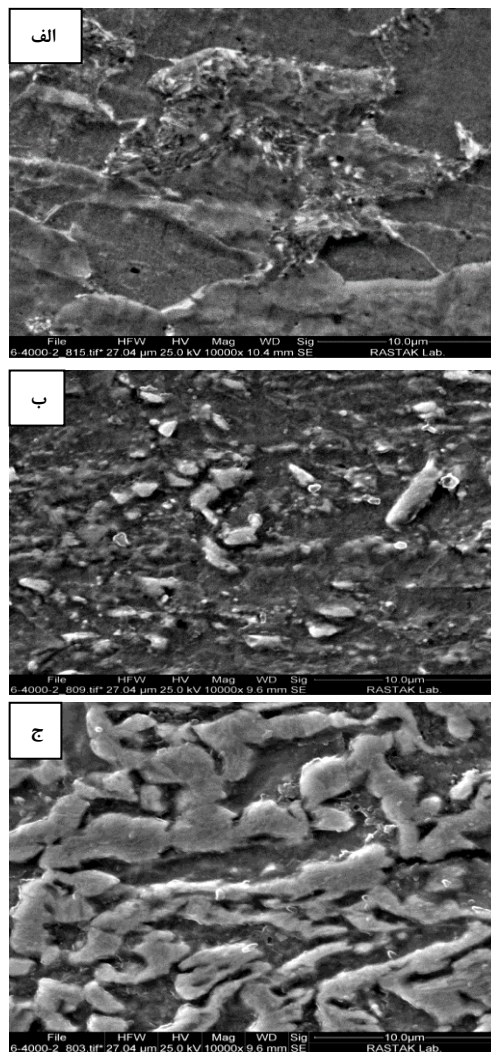
نمونه	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	σ_y/UTS	e_u (%)	e_t (%)
۷۵۰-A	۳۹۵	۴۶۰	۰/۸۵	۲۰/۲	۲۱/۷
۷۷۵-A	۴۳۰	۶۶۲	۰/۶۵	۱۷/۸	۱۹/۴
۸۰۰-A	۴۵۵	۶۹۵	۰/۶۵	۱۶/۷	۱۸/۱
۷۵۰-B	۴۴۴	۷۱۸	۰/۶۱	۱۶/۳	۱۷/۸
۷۷۵-B	۴۵۷	۷۳۹	۰/۶۱	۱۴/۶	۱۶/۲
۸۰۰-B	۴۶۹	۷۸۱	۰/۶۰	۱۳/۵	۱۵/۲
۷۵۰-C	۴۵۳	۷۸۸	۰/۵۷	۱۴/۱	۱۶/۱
۷۷۵-C	۴۷۵	۸۳۹	۰/۵۶	۱۳/۲	۱۵/۵
۸۰۰-C	۴۷۷	۸۵۱	۰/۵۶	۱۱/۶	۱۴

شکل ۷ تأثیر منگنز و دمای آنیل میان بحرانی را بر استحکام کششی فولادهای دوفازی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد. در کلیه فولادها صرف‌نظر از مقدار منگنز فولاد، افزایش دمای آنیل موجب افزایش استحکام کششی فولاد دوفازی می‌شود. علت این امر را می‌توان در افزایش کسر حجمی فاز سخت مارتنزیت با افزایش دمای آنیل بیان کرد. تغییر در میزان منگنز فولاد دوفازی بر اساس شکل ۷ باعث تغییر در استحکام کششی فولاد می‌شود؛ به‌گونه‌ای که افزایش منگنز در حالت کلی موجب افزایش استحکام می‌گردد. افزایش در کسر حجمی مارتنزیت فولاد، علیرغم افزایش اثر استحکام‌بخشی محلول جامد به‌ویژه در فاز مارتنزیت ناشی از انحلال منگنز در آن، علت این امر است [۱۱]. شکل ۸ ریزساختار الکترونی فولادهای دوفازی را که مؤید این مورد است، نشان می‌دهد. بنابراین، شاید بتوان این‌گونه اظهار کرد که مکانیزم استحکام‌بخشی از طریق مارتنزیت در کنار مکانیزم محلول جامد ناشی از انحلال منگنز، از عوامل بهبود استحکام هستند.

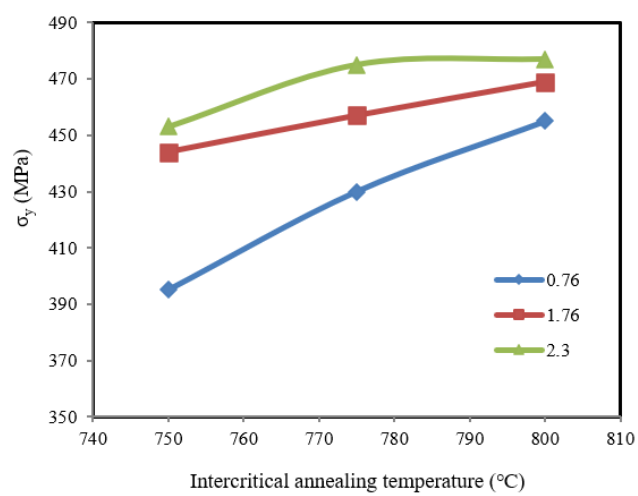
شکل ۹ تأثیر مقدار منگنز و دمای آنیل بین بحرانی و به‌عبارت‌دیگر کسر حجمی مارتنزیت را بر استحکام تسلیم فولادهای دوفازی نشان می‌دهد. روند تغییر استحکام تسلیم با عوامل فوق مشابه با استحکام کششی است. مشاهده می‌شود که استحکام تسلیم نیز همانند استحکام کششی با دمای آنیل و درصد منگنز افزایش می‌یابد ولی شدت افزایش آن در مقایسه با استحکام کششی ناچیزتر است. وقتی که نمونه‌ها در منطقه دوفازی آستنیت و فریت حرارت داده می‌شوند مناطق پرلیت به آستنیت تبدیل و با کوئنچ کردن فولاد، آستنیت موجود به مارتنزیت تبدیل می‌شود و به‌صورت مناطقی جزیره‌ای شکل درزمینه‌ی فریت ظاهر می‌شوند. تغییرات کسر حجمی مارتنزیت برابر با تغییرات درصد آستنیت است. افزایش چگالی نابجایی‌ها به واسطه ایجاد مارتنزیت در ساختار و کم شدن نابجایی‌های متحرک در ساختار فریت می‌تواند استحکام کششی و استحکام تسلیم فولادهای دوفازی را افزایش دهند [۲۹]. با افزایش مقدار درصد منگنز، سختی‌پذیری آستنیت افزایش می‌یابد، در نتیجه باعث کاهش دمای بحرانی برای استحاله آستنیت می‌شود و لذا، می‌توان تا حدود زیادی اطمینان داشت که تمام آستنیت از طریق سرد کردن سریع به مارتنزیت تبدیل می‌شود.



شکل ۷ تأثیر منگنز و دمای آنیل بین بحرانی بر استحکام کششی فولادهای دوفازی

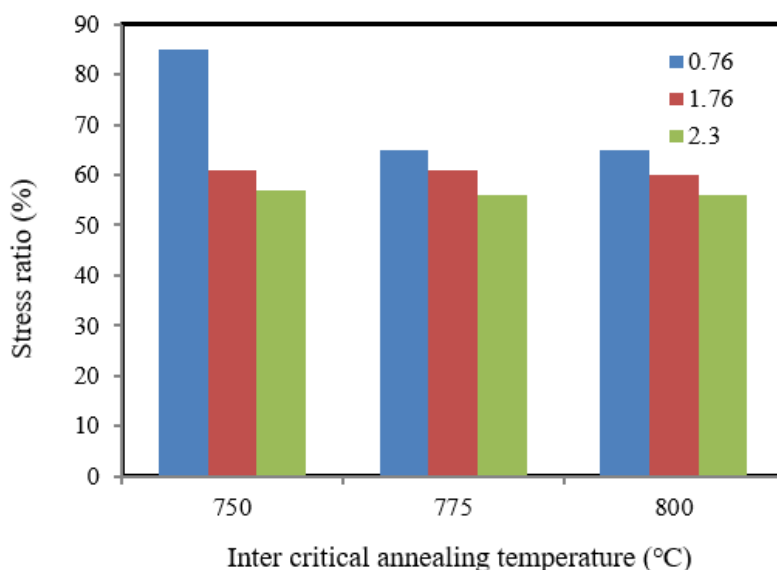


شکل ۸ ریزساختار الکترونی فولادهای دوفازی آنیل بین بحرانی شده در 775°C . الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C

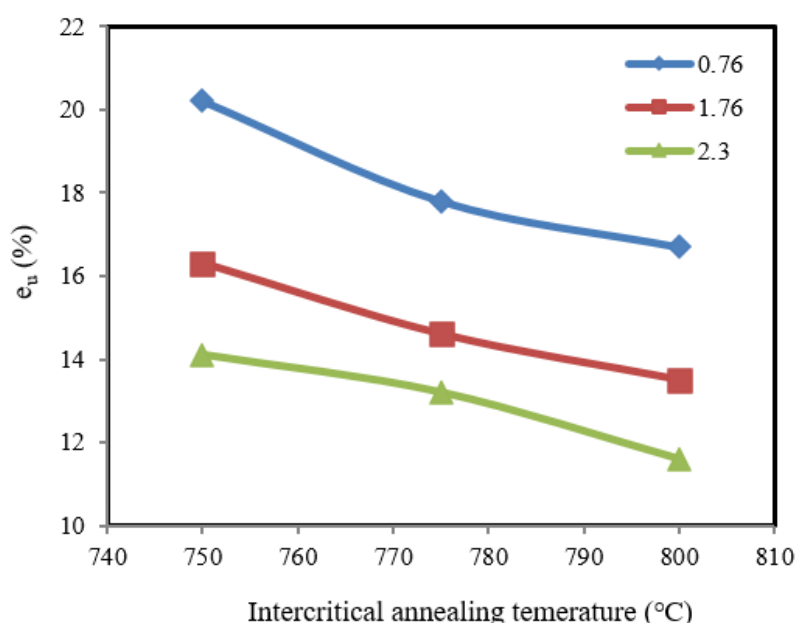


شکل ۹ تأثیر منگنز و دمای آنیل بین بحرانی بر استحکام تسلیم فولادهای دوفازی

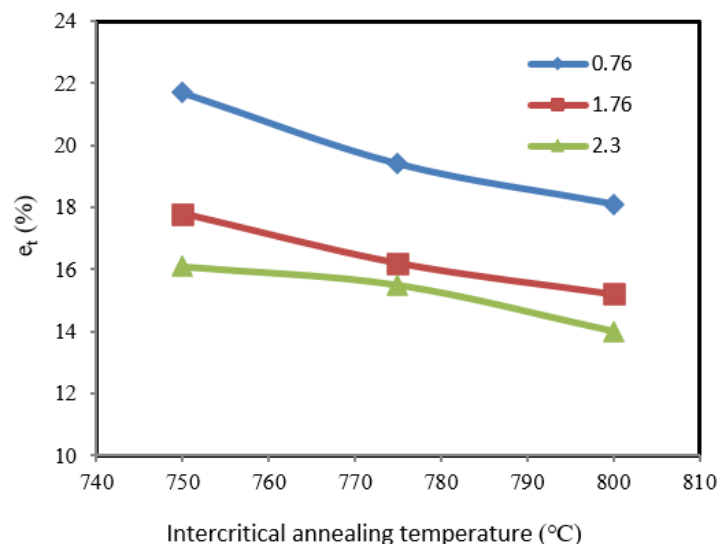
شکل ۱۰ نسبت تسلیم فولادهای دوفازی را به صورت تابعی از دمای آنیل و میزان منگنز فولاد نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد نسبت تسلیم در هر یک از دماهای آنیل با افزایش میزان منگنز کاهش می‌یابد. این در حالی است که دمای آنیل میان بحرانی تقریباً بر این فاکتور بی‌تأثیر است. همچنین روند تغییرات با دمای آنیل در کلیه دماهای آنیل مشابه است. این فاکتور فقط در کم منگن‌ترین و پایین‌ترین دمای آنیل بین بحرانی زیاد است و در سایر نمونه‌ها کم می‌باشد که از جمله ویژگی‌های مطلوب فولادهای دوفازی است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب کرنش یکنواخت و کرنش کل فولادها را به صورت تابعی از مقدار منگنز فولاد و دمای آنیل میان بحرانی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت هر قدر دمای میان بحرانی و درصد منگنز در فولاد دوفازی افزایش یابد، استحکام کششی و استحکام تسلیم افزایش و تغییرات ازدیاد طول و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابند.



شکل ۱۰ تأثیر منگنز و دمای آنیل بین بحرانی بر نسبت تسلیم فولادهای دوفازی



شکل ۱۱ تأثیر منگنز و دمای آنیل بین بحرانی بر کرنش یکنواخت فولادهای دوفازی



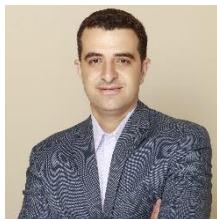
شکل ۱۲ تأثیر منگنز و دمای آنیل بین بحرانی بر کرنش کل فولادهای دوفازی

۴- نتیجه گیری

منگنز به عنوان یک عنصر آلیاژی اقتصادی در فولادها استفاده می شود. آز آنجایی که مهم ترین کاربرد فولاد دوفازی در صنعت خودروسازی است لذا، لازم است این فولادها کم کربن باشند. از طرفی به منظور ایجاد فاز مارتنزیت در این فولادها نیاز به سختی پذیری قابل ملاحظه است. منگنز در این راستا می تواند، مؤثر باشد. در این تحقیق به منظور شناسایی نقش این عنصر بر عملکرد فولاد دوفازی از سه مقدار متفاوت منگنز همراه با کسرهای متفاوت آستنیت در منطقه دوفازی به واسطه اعمال دماهای میان بحرانی متفاوت استفاده شد. منگنز تأثیر قابل ملاحظه ای بر کسر حجمی مارتنزیت و در نتیجه ترکیب شیمیایی آن دارد. لذا؛ انتظار می رود که خواص کششی فولادهای دوفازی را تحت تأثیر قرار دهد. بیشترین استحکام تسلیم و کششی مربوط به بیشترین دمای آنیل میان بحرانی و بیشترین درصد منگنز که با بیشترین کسر حجمی مارتنزیت همراه بود، می باشد. این امر بر این نکته دلالت می کند که کسر حجمی مارتنزیت در مقایسه با ترکیب شیمیایی آن فاکتوری مؤثرتر است. نتایج نشان داد که دمای آنیل بر فولاد کم منگنز بیشترین تأثیر را دارد، در حالی که در فولاد با منگنز متوسط و پر منگنز تغییر قابل ملاحظه ای در استحکام کششی و تسلیم با دمای آنیل مشاهده نشد. همچنین این نکته حائز اهمیت است که تأثیر پذیری استحکام کششی از منگنز در فولاد دوفازی در مقایسه با استحکام تسلیم بیشتر بود که این امر دلالت بر اثرگذاری منگنز بر کارسختی فولاد دوفازی است که می تواند موضوعی مهم در آینده برای بررسی باشد. آزمون کشش همچنین نشان داد که با افزایش کسر حجمی مارتنزیت انعطاف پذیری فولاد دوفازی کاهش می یابد ولی به هر حال انعطاف پذیری این فولادها در یک استحکام بالا (بیشتر از ۷۰۰ MPa) همچنان در حد قابل قبول (کرنش حداقل ۱۵٪) باقی می ماند. نتایج کشش حاکی از این است که بطور کلی وجود منگنز بالا در حد ۲/۳٪ وزنی برای رفتار کششی مطلوب است.

Authorship Contribution Statement

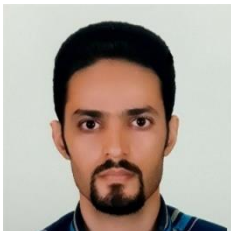
Dr. Ashkan Nouri



Biography: Associate Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Project administration, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Seyed Mohsen Emami



Biography: Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, review, Investigation.

Mohammad Hashemian

Biography: MSc., Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Iran.

Contribution Statement: Conducting experiments.

۵- مراجع

- [1] Rigsbee J M, Vanderarend P. Laboratory studies of microstructure and structure-property relationship in dual-phase HSLA steels. Formable HSLA and dual-phase steels, In: Davenport A (ed.) TMS-AIME. 1979; 56-86.
- [2] Rashid M S. GM 980X-A unique high strength sheet steel with superior formability. SAE Trans. 1976; 85: 938-949.
- [3] Speich G, Miller R. Mechanical properties of ferrite-martensite steels. Structure and properties of dual-phase steels. In: Kot R, Morris J (ed.) New York, TMS-AIME. 1979; 145-182.
- [4] Deng Y, Yang Y. Fine-grained dual-phase steels fabricated via cold-rolling ferrite-martensite structure and subsequent intercritical annealing. J. Mater. Res. Technol. 2023; 27: 3881-3886.
- [5] Peng S, Yingjie R, Xianguang Z, Hongli W, Jiajun C, Yiwu P, Jianhao Y, Huaibei Z, Jian Z. Role of martensite morphology on mechanical response of dual-phase steel produced by partial reversion from martensite. 2024; 893: 146116.
- [6] Jamshidi I, Bisadi H. Numerical investigation of the microstructure of microalloyed steel in hot rolling operation Mech. Adv. Smart Mater. J. 2022; 2: 365-384. (In Persian)
- [7] Gao B, Hu R, Pan Z, Chen X, Liu Y, Xiao L, Cao Y, Li Y, Lai Q, Zhou H. Strengthening and ductilization of laminate dual-phase steels with high martensite content. J. Mater. Sci. Technol. 2021; 65: 29-37.
- [8] Qing-Qiang R, Sung-Il B, Dong A, Dieter I, Mingfang Z, Krakauer B, Seidman D. The effects of heat-treatment parameters on the mechanical properties and microstructures of a low-carbon dual-phase steel. Mater. Sci. Eng. A. 2023; 888:145801.
- [9] Nouri A, Badkoobeh F, Rabiei N, Hassannejad H. Evolutions of microstructural and mechanical properties of tempered dual-phase steels influenced by silicon content and the intercritical annealing temperature. J. Mater. Eng. Perf. 2022; 31: 5441-5457.
- [10] Wang H, Yuan G, Kang J, Cao G, Li C, Misra R, Wang G. Microstructural evolution and mechanical properties of dual phase steel produced by strip casting. Mater. Sci. Eng. A. 2017; 703: 486-495.

- [11] Niu G, Ding C, Liu Z, Jia X, Chen H, Gong N, Wang Y, Tan D, Cheh C, Misra R, Wu H. Achieving high strength and high ductility of dual-phase steel via alternating lamellar microstructure. *Mater. Sci. Eng. A*. 2024; 892: 146072.
- [12] Erdogan M. Effect of austenite dispersion on phase transformation in dual phase steel. *Scr. Metal*. 2003; 48: 501-506.
- [13] Nouri A, Saghaian H, Kheirandish S. Influence of volume fraction of martensite on the work hardening behaviour of two dual-phase steels with high and low silicon contents. *Int. J. Mater. Res.* 2010; 101: 1286-1292.
- [14] Schemmann L, Zaefferer S, Raabe D, Friedel F, Mattissen D. Alloying effects on microstructure formation of dual phase steels. *Acta Mater.* 2015; 95: 386-398.
- [15] Ebrahimian A, Banadkouki S. Effect of alloying element partitioning on ferrite hardening in a low alloy ferrite-martensite dual phase steel. *Mater. Sci. Eng. A*. 2016; 677: 281-289.
- [16] Al-Abbasi F M, Nemes J A. Micromechanical modeling of dual phase steels. *Int. J. Mech. Sci.* 2003; 45: 1449-1465.
- [17] Nawaz B, Hu Q, Zhang T, Wang L, Li Y, Xu W. The influence of intercritical temperature, ferrite-austenite morphology, and orientation relationship on martensitic transformation in dual phase steels. *Mater. Today Commun.* 2024; 41: 110275.
- [18] Tayanc M, Aytac A, Bayram A. The effect of carbon content on fatigue strength of dual-phase steels. *Mater. Des.* 2007; 28: 1827-1835.
- [19] Sarwar M, Priestner R. Hardenability of austenite in a dual-phase steel. *J. Mater. Eng. Perf.* 1999; 8, 380-384.
- [20] Nouri A, Kheirandish S, Saghaian H. A study of redistribution of silicon in dual-phase silicon steels. 2018; 59: 569-574.
- [21] Goto S, Kami C, Kawamura S. Effect of alloying elements and hot-rolling conditions on microstructure of bainitic-ferrite/martensite dual phase steel with high toughness. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015; 648, 436-442.
- [22] Gündüz S. Effect of chemical composition, martensite volume fraction and tempering on tensile behaviour of dual phase steels. *Mater. Lett.* 2009; 27: 2381-2383.
- [23] Qu J, Dabboussi W, Nemes J. Effect of microstructure and chemical composition on dynamic factor of high strength steels. *Mater. Sci. Technol.* 2008; 24: 957-963.
- [24] Ha M, Pham M K, Nguyen H H. Effects of the thermomechanical treatment on the microstructure and mechanical properties of ferrite – martensite dual phase steel. 2023; 124: 49-55.
- [25] Güral A, Çavuşoğlu O, Şahin B, Altuntaş O, Yılmaz T. Long-time strain aging responses of commercial dual-phase steels at room temperature. 2023; 50: 705-709.
- [26] Terao N, Cauwe B. Influence of additional elements (Mo, Nb, Ta and B) on the mechanical properties of high-manganese dual-phase steels. *J. Mater. Sci.* 1988; 23: 1769-1778.
- [27] Terao N, Baugnet A. High-manganese dual-phase steels, strengthened by additional elements (Cr, Ti, V and W). *J. Mater. Sci.* 1990; 25: 848-858.
- [28] Nouri A, Saghaian H, Kheirandish S. Effect of silicon content and intercritical annealing on manganese partitioning in dual phase steels. *Iron Steel Res. Int.* 2010; 17: 44-51.
- [29] Dulucheanu C, Severin T, Cerlinca D, Irimescu L. Structures and mechanical properties of some dual-phase steels with low manganese content. *Metals*. 2022; 12: 189-200.